

VŠB Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojů

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti**

*Influence of Selected Measuring Parameters to Roundness  
Deviation*

Student:

Bc. Ondřej Mizera

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Mizera**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**  
Specializace: **20 Strojírenská technologie**  
Téma: **Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti**  
**Influence of Selected Measuring Parameters to Roundness Deviation**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Přehled současného stavu problematiky.
3. Analýza metod měření.
4. Měřicí technika pro hodnocení odchylky kruhovitosti.
5. Experimentální část.
6. Zhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: VUT v Brně, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
- [2] Čepová, L.; Petřkovská, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže FS VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [3] PETŘKOVSKÁ, L. ; ČEPOVÁ, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012. 142 s. ISBN 978-80-248-2771-1. Dostupné na <http://projekty.fs.vsb.cz/459/?ucebni-opory>.
- [4] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie, část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 104 s. ISBN 80-248-0671-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing.et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vytvořil svépomocí včetně tabulek a obrázku pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Lenky Čepové, Ph.D. a veškeré materiály z kterých jsem čerpal jsou uvedeny v zadní části diplomové práce.

V Ostravě ..... 13. 5. 2017 .....

  
.....

Podpis studenta

Prohlašuji že,

jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školního představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst.3).

- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě ..... 13. 5. 2014 .....

  
.....

Podpis studenta

## ANOTACE DIPLOVOVÉ PRÁCE

MIZERA, O. *Vliv vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 72 s., Vedoucí práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá vlivem vybraných parametrů měření na odchylku kruhovitosti. Úvodní části je popsán přehled problematik měření odchylek kruhovitosti a veškeré souvislosti s tématem diplomové práce. Experimentální část byla měřena na třísouřadnicovém měřicím stroji WENZEL LH 65 X3M Premium se softwaru Metrosoft QUARTIZ R6 v laboratoři VŠB-TU Ostrava, fakulty strojní, Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Hlavním výsledkem diplomové práce je analýza vlivu metod připisování a filtrací u vyhodnocení odchylek kruhovitosti.

## ANOTATION OF THESIS

MIZERA, O. *Influence of Selected Measuring Parameters to Roundness Deviation: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 65 p. Thesis head: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Master thesis is dealing with the influence of selected measuring parameters to roundness deviation. In the introductory part is described an overview of the problems of measurement of roundness deviations and all the connection with the topic of master thesis. The experimental part was measured on the WENZEL LH 65 X3M Premium coordinate measuring machine and using the software Metrosoft QUARTIZ R6 in the laboratory of the VŠB-TU Ostrava, the Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining, Assembly and Engineering Metrology. The main result of the master thesis is the analysis of the influence of the compared methods and filtration in the evaluation of roundness deviation.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	11
<b>2</b>	<b>Přehled současného stavu problematiky</b>	13
2.1	Parametry hodnocení odchylek kruhovitosti	13
2.2	Kruhovitost	16
2.3	Profily	17
2.4	Metody připisování a filtry	17
2.4.1	Filtrování a eliminace odlehlých hodnot	21
2.4.2	Terminologie funkce filtrů	24
2.5	Normy spojené s kruhovitosti	25
<b>3</b>	<b>Analýza metod měření</b>	26
3.1	Měřicí metody odchylek kruhovitosti	26
3.1.1	Spojité metoda	26
3.1.2	Nespojitá metoda (diskrétní)	28
3.1.3	Obecné měření odchylek kruhovitosti	29
<b>4</b>	<b>Měřicí technika pro hodnocení odchylky kruhovitosti</b>	30
4.1	Konvenční měřicí stroje	31
4.2	Absolutní měřidla	31
4.3	Souřadnicové měřicí stroje	32
4.3.1	Základní prvky CMM	36
4.3.2	Vedení CMM	38
4.3.3	Snímací dotyky	39
<b>5</b>	<b>Experiment</b>	43
5.1	Výroba měřené součásti	43
5.2	Materiál pro experiment	44
5.3	Měření experimentu	46
5.4	Chyby měření	47

5.5	Maximální přípustná chyba MPE (Maximum Permissible Error).....	48
5.6	Požítá zařízení pro měření .....	50
5.7	Statistické vyhodnocení .....	51
5.8	Grafické vyhodnocení.....	52
5.9	Vyhodnocování měření.....	64
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>68</b>

**Seznam použitého značení**

<b>Symbol</b>	<b>Význam</b>	<b>Jednotka</b>
a	x-ová souřadnice excentricity	(mm)
A	referenční kružnice	
a <sub>1</sub>	kladná místní odchylka	(μm)
A <sub>1</sub>	kružnice, nebo válec se středem C1 nebo osou Z1	
a <sub>2</sub>	záporná místní odchylka	(μm)
A <sub>2</sub>	kružnice, nebo válec se středem C2 nebo osou Z2	
b	y-ová souřadnice excentricity	(mm)
c	z-ová souřadnice excentricity	(mm)
C <sub>1</sub>	střed kružnice A1	
C <sub>2</sub>	střed kružnice A2	
CMM	souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)	
CNC	počítačem řízený systém (Computer Numerical Control)	
D <sub>1</sub>	rozměr součásti	(mm)
D <sub>2</sub>	rozměr součásti	(mm)
f	posuv	(mm)
GPS	geometrická specifikace výrobku (Geometrical Product Specification)	
HRC	tvrdost podle Rockwella	
ISO	mezinárodní označení norem	
LRD	místní odchylka kruhovitosti	(μm)
LSC	střední kružnice nejmenších čtverců (last squares mean circle)	
MCC	nejmenší opsaná kružnice (minimum circumscribed circle)	



MIC	největší vepsaná kružnice (maximum inscribed circle)	
MZC	nejmenší pásmo – mezikruží (minimum zone circles)	
$r_c$	poloměr zaoblení hrotu nástroje	(mm)
$r$	poloměr zaoblení hrotu snímače	(mm)
$R_{max}$	maximální vzdálenost poloměru kružnice	
$R_{min}$	minimální vzdálenost poloměru kružnice	(mm)
$RON_p$	největší vrchol odchylky kruhovitosti (peak-to-reference roundness deviation)	( $\mu\text{m}$ )
$RON_q$	střední kvadratická hodnota odchylky kruhovitosti (root mean square roundness deviation)	( $\mu\text{m}$ )
$RON_t$	rozkmít odchylek kruhovitosti (peak-to-valley roundness deviation)	( $\mu\text{m}$ )
$RON_v$	největší prohlubeň odchylky kruhovitosti (reference-to-valely roundness deviation)	( $\mu\text{m}$ )
$t$	teplota	( $^{\circ}\text{C}$ )
$up$	přesnost měřícího zařízení	( $\mu\text{m}$ )
$x, y, z$	souřadnicové osy	
$\emptyset$	průměr součásti	(mm)
$\alpha, \beta$	úhly	( $^{\circ}$ )
$r_1$	radiální vzdálenost	( $\mu\text{m}$ )
$r_2$	radiální vzdálenost	( $\mu\text{m}$ )
$z$	odchylka kruhovitosti	( $\mu\text{m}$ )
$Z_c$	nejmenší opsaná kružnice	( $\mu\text{m}$ )

$Z_i$	největší vepsaná kružnice	( $\mu\text{m}$ )
$Z_q$	střední kružnice nejmenších čtverců	( $\mu\text{m}$ )
$Z_z$	nejmenší pásmo – mezikruží	( $\mu\text{m}$ )
$\theta$	okamžitý úhel profilu kruhovitosti	( $^\circ$ )
$3D$	prostorové zobrazení	

# 1 ÚVOD

Dnešní doba je ovládaná za pomoci počítačové podpory. Strojní průmysl je toho velkým důkazem, obzvlášť odvětví strojírenské metrologie. Doba konvenčních metod měření, dlouhé a náročné odečítání veličin se, pomalu, ale jistě odsouvá do pozadí. Nynější situace si žádá rychlejší, přesnější a spolehlivější zařízení, které bude splňovat veškerá kritéria zákazníků, jsou to oni, kdo udává trend. Zákazník určuje své požadavky na zhotovení součástí v daných parametrech a tím nutí výrobce aktualizovat své jak výrobní, tak i kontrolní pracoviště.

Souřadnicový měřicí stroj (dále jen CMM) je zařízením, bez kterého si dnešní dobu nikdo ani nedovede představit. Posunutím hranic přesností, měřitelnosti, spolehlivosti se stal základním požadavkem zákazníků při přebírání zakázek. V současnosti se CMM stal jedním ze základních vybavení každé výrobní společnosti s vyšším požadavkem na přesnost výroby. Každý výrobek se skládá z nespočtu geometrických útvarů. Při důkladnějším rozložení zjistíme, že každý útvar je kotován a je mu přiřazena toleranční hodnota. Toto vše by nebylo bez podpory počítačové technologie, která v současné době ovládá celou tuto oblast měřicí techniky.

Stále se nedaří i za podpory nejšpičkovějších softwarů a výrobních zařízení, vyrobit výrobek dokonalého tvaru a kvality. Působí zde mnoho faktorů např.: vibrace, kvalita materiálu, technologie opracování atd., velmi důležitým aspektem při kontrole kvality za pomoci CMM je dodržení určitých zásad pro měření, ať můžeme minimalizovat a snažit se co nejméně ovlivnit měření. Je třeba mít na paměti, že ne každá společnost naměří stejné úchytky kruhovitosti na stejném výrobku. Může se jednat o odlišnosti komponentu osazených CMM, obsluhou, zvoleným typem referenční kružnice. Není pravidlem, že všichni výrobci umožňují použití všech filtrů a metod připasování pro vyhodnocení.

Jedním z nejsledovanějšího parametru výroby rotačních součástí je kruhovitost v úzké návaznosti na drsnost povrchu. Kruhovitosti je věnována obzvlášť pozornost, jedná se o geometrický tvar zajišťující životnost zařízení, bezpečnost provozu a manipulace. Pro tyto hodnoty je důležité neustále zdokonalovat a zkvalitňovat metody hodnocení povrchu a jejich geometrických tvarů.

V praxi je pro měření úchylek kruhovitosti spousta metod, žádná z nich ale nedefinuje jak hodnotit úchytky kruhovitosti v návaznosti na použitý způsob filtru a metod připasování. Diplomová práce poukazuje na problematiku určování metod připasování

a eliminaci odlehlých hodnot, které mají vliv na odchylku kruhovitosti. Odchylka kruhovitosti je stanovena konstruktérem v rámci funkčnosti dílu.

## 2 Přehled současného stavu problematiky

Dnešní trend ve strojírenství vyžaduje přesnosti na hranici měřitelnosti jednotlivých CMM a jejich softwaru. Dříve se používaly souřadnicové měřicí stroje jen pro finální výrobky, dnes se využívá měření výrobku v průběhu celé výroby. Jako pomocná kontrola se využívají CMM integrované do CNC obráběcích center, aby se zvýšila kontrola výroby a předešlo se ztrátám ve výrobě, odhalení závad ve výrobě a 100 % kontrola vyráběných dílů je prioritní záležitostí každé společnosti, přičemž toto hledisko je velmi hlídaným faktorem. Při výrobě rotačních součástí je jedním z nejsledovanějších faktorů úchylka kruhovitosti, kterou ovlivňuje velmi mnoho vstupů, počínaje upnutím, technologií opracování až po teplotu. Měření a vyhodnocení úchylek kruhovitosti nabývá nový rozměr, hledají se postupy pro nejpřesnější vyhodnocení. Provádí se interní experimenty, nic z toho by nevznikalo nebýt poptávky zákazníků po snižování tolerančních hodnot a přísnějších pravidel pro přejímku zboží.

### 2.1 Parametry hodnocení odchylek kruhovitosti

„Úchylky kruhovitosti jsou měřeny v rovinách kolmých na osu kontrolované rotační plochy. Norma stanovuje nejmenší počet měření a poloha rovin měření v závislosti na délce válcové plochy a poměru délky a průměru [1].“

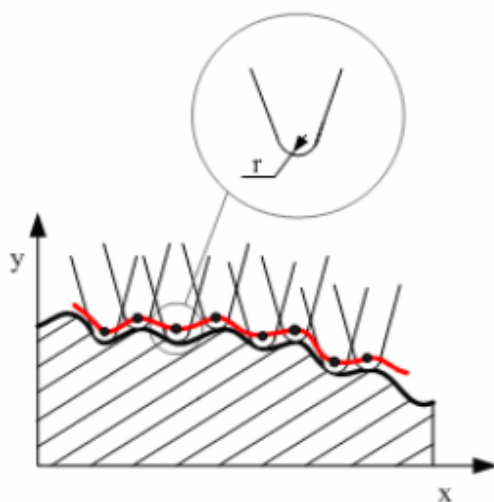
Rotační funkční plochy jsou významné díky jejich četnosti a z hlediska požadavků na geometrickou jakost. Geometrická jakost zde rovněž zahrnuje kruhovitost a složky struktury povrchu – vlnitost povrchu a drsnost povrchu. Vlnitost povrchu bývá do kruhovitosti zahrnuta anebo filtrací eliminována. Drsnost povrchu se po obvodu nezjišťuje – jedná se o složku podélnou. Přesnost metody závisí od tvaru dotyku na snímaném profilu, který vykresluje dráhu dotyku snímače [2].

Úchylky kruhovitosti mají velkou souvislost s drsností, jedná se o dvojici nejsledovanějšího parametru při opracování materiálu jednou z metod obrábění. Tím si zasluhuje velkou pozornost, neboť zákazník si určuje požadavky přesnosti a drsnosti. Dnešním trendem je chloubka každé výrobní firmy ukazovat, jak přesné mají výrobní zařízení a samozřejmě jak přesně dokážou měřit. Neustálý vývoj hodnocení přesnosti je zapříčiněn poptávkou trhu. Důležité je nezapomínat, že přesnost měření není jen samotný měřicí proces, ale o správném vyhodnocení rozhodují i okolní vlivy. V měření a to v našem případě

strojírenském odvětví, kde se bavíme o jednotkách „ $\mu m$ “ hrají velkou roli otřesy. Tento nežádoucí vliv můžeme rozdělit na otřesy, které vznikají externě v hale nebo zvenčí, jsou přenášeny povrchem a jedná se převážně o vibrace způsobené rotujícími stroji nebo stroji s tlakovými rázy v okolí měřicího centra, přenášení vibrace z dopravy. Druhým aspektem vibrací jsou interní vibrace, které způsobuje vlastní zařízení CCM. Posouvání pinoly po vzduchových ložiskách má za úkol eliminovat otřesy a plynulejší chod přejezdu v osách ale jednotlivé koncové body v programu způsobují mírné otřesy přenášené do snímacího dotyku.

Kritériem vyhodnocení odchylek kruhovitosti může být použití typu CMM. Jednotlivé konstrukční výrobky mají rozdílné specifikace a podléhají rozdílným normám dle užití. Účel součásti je úzce vzpjatý s metodou měření a hodnocení. Úchyly kruhovitosti můžeme měřit jak v laboratorních podmínkách nebo v dílenských prostorech, rozhodující je konstrukce a účel výrobku kde hraje také vliv toleranční pole. Při diskretním způsobu snímání je možné použít dvoubodovou nebo třibodovou metodu (norma ČSN ISO 4292), lze také použít odměřování souřadnic zúženého výběru počtu bodů z obvodu při měření na CMM.

- zpracování toku signálu nesoucí informace,
- interpelace a vyhodnocení výsledných dat měření.



Obr. 1 – příklad snímání profilu na konvenčním přístroji spojitou metodou: r-poloměr [9].

- vzdálenost odchylek kruhovitosti – (LSC, MCC, MIC, MZC)  $RON_t$  – hodnota největší kladné místní odchylky kruhovitosti spočítané s absolutní hodnotou největší záporné místní odchylky,
- střední kvadratická hodnota odchylky kruhovitosti – (LSCI)  $RON_q$  – odmocnina ze součtu čtverců místních odchylek kruhovitosti ze střední kružnice nejmenších čtverců, je vyjádřena podle vztahu (2.1).

$$RON_q = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} LDR^2 d\theta}$$

(2.1)

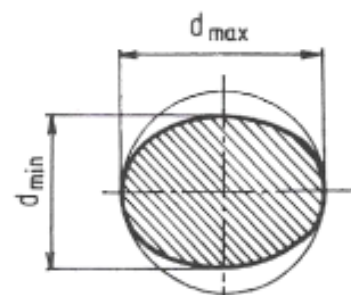
Kde:

LDR: místní odchylka kruhovitosti

 $\theta$ : okamžitý úhel profilu kruhovitosti

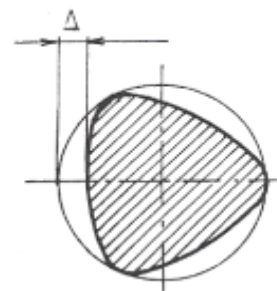
Zvláštním případem kruhovitosti může být i *ovalita* (obr. 2), případně *hranolovitost* (obr. 3)

- za ovalitu určujeme tělesa s profilem ve tvaru oválu, přičemž nejmenší a největší průměr se nachází ve směrech na sebe kolmých



Obr. 2 Ovalita [5].

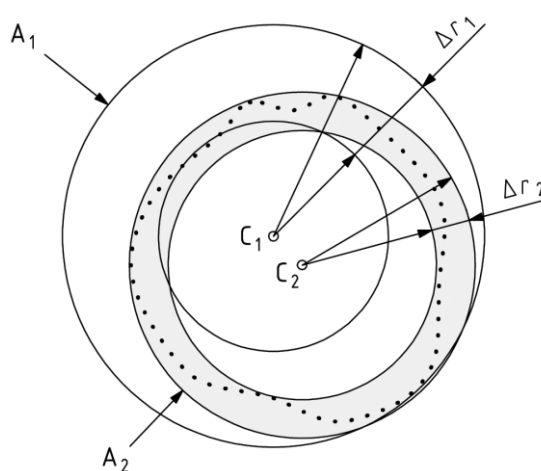
- za hranolovitost můžeme považovat válcový výrobek s mnoho hranovým profilem tvaru. Lze jej rozdělit dle počtu hran. Malý počet hran znamená stejný průměr příčných řezů ve všech směrech.



Obr. 3 Hranolovitost [5].

## 2.2 Kruhovitost

Kruhovitost jako kontrola tvaru je jednou z velmi důležitých vlastností každého materiálu. Má vliv na životnost a spolehlivost. Např. dosedací plochy klikové hřídele, valivá ložiska, apod. Tolerance je vyhovující, když skutečný profil leží mezi 2 soustřednými kružnicemi. Rozdíl průměrů soustředných kružnic (šířka mezikruží) je hodnota tolerance. Velikost a poloměr středu kružnic se volí tak, aby radiální vzdálenost byla co nejmenší v šířce mezikruží. [7]



Obr. 4 Hodnocení minimální zóny pro kružnici. [7]

Kružnice s označením  $A_2$  je správná toleranční podmínka dvou soustředných kružnic, přičemž jejich radiální vzdálenost  $\Delta r_2$  je rovna nebo menší předepsané toleranci kruhovitosti.



## 2.3 Profily

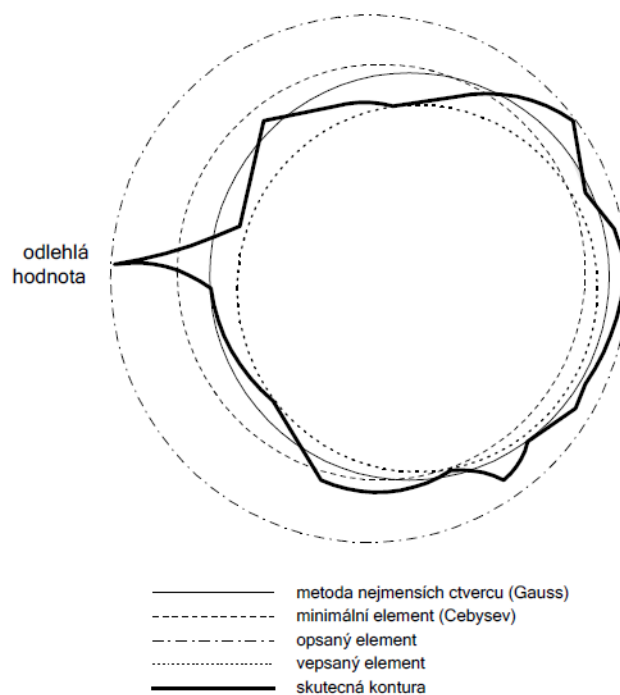
- **Skutečný profil kruhovitosti** – výsledný profil řezu skutečného povrchu kruhové součásti rovinou kolmou k její určené ose, tato definice určuje jakoukoli část povrchu bez ohledu na velikost.
- **Transformace profilu** – činnost transformace profilu v kterémkoliv stadiu, např. snímačem, registračním přístrojem nebo filtrem.
- **Snímaný profil** – profil stanoven dráhou snímače, zaměřující se někdy se skutečným kruhovým profilem, všechny měřené parametry kruhovitosti se vztahují k snímaným profilům.
- **Upravený profil** – úmyslná úprava ze snímaného profilu, za pomoci elektronického, analogového nebo číselového filtru.
- **Zobrazený profil** – znázornění nasnímaného profilu nebo jinak upravený profil jednou z následujících metod úprav profilu na přístroji.

## 2.4 Metody připisování a filtry

Metody připisování jsou matematické metody výpočtu, které nám umožňují vybrat správnou metodu pro zvolenou strategii měření a tím rozhodnout o nejpřesnějším výsledku měření.

Nová terminologie sebou přináší nové názvy metod:

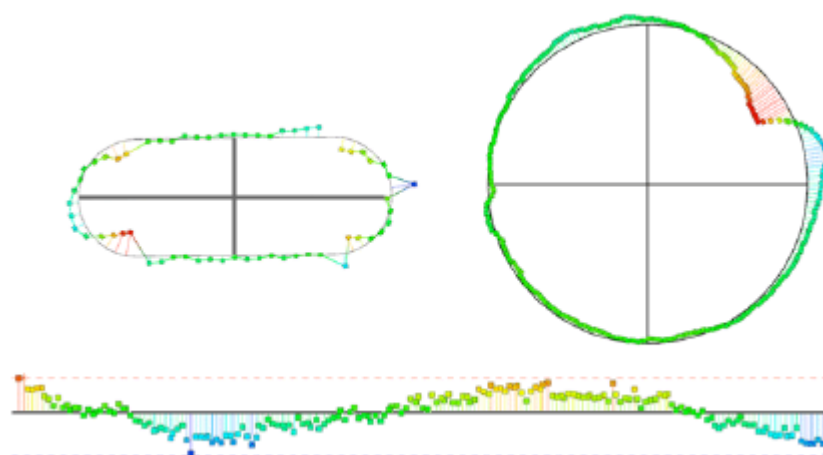
- Čebyšev (kritérium minima)
- Gauss
- Element L1
- Výpočet jako minimálně opsaný, respektive maximálně vepsaný element
- Výpočet jako tangenciální element



Obr. 5 – Metody přizpůsobení

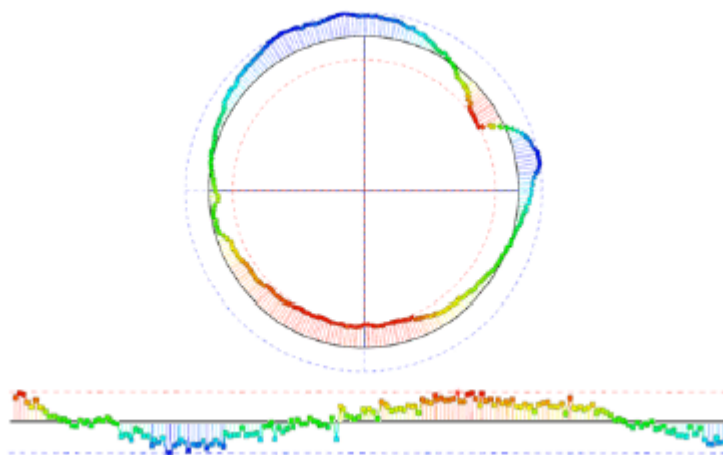
**Terminologie:**

- **Gauss** – dříve (LSCI – střední kružnice nejmenších čtverců) = jedná se o střed, střední kružnice nejmenších čtverců, přičemž součet čtverců odchylek od zadaného profilu je nejmenší. Toto přizpůsobení je minimálně ovlivňováno odlehlými hodnotami, výsledky za pomoci přizpůsobení Gaussem jsou jednoznačné a minimálně náročné na výpočet. Jedná se o nejpoužívanější metodu v rámci malého spektra bodů.



Obr. 6 Aplikace pomocí Gausse

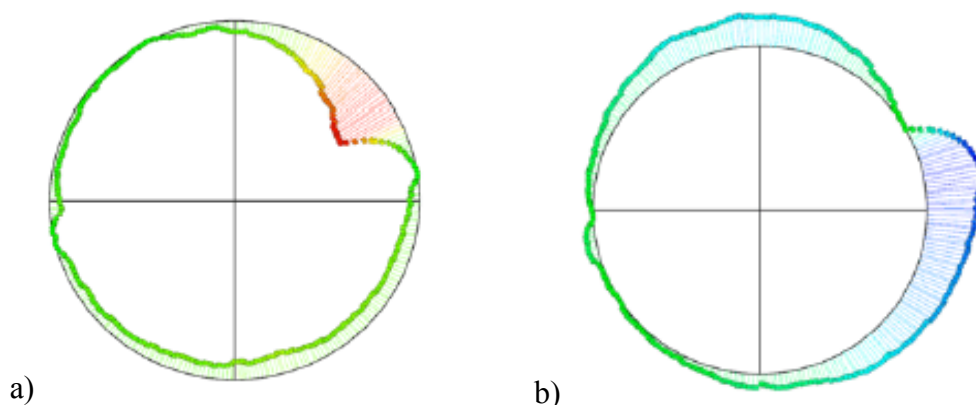
- **Čebyšev** – dříve (MZCI – nejmenší pásmo mezikruží) = jedná se o dvě soustředné kružnice obklopující vybraný profil a zároveň mají radiální vzdálenost nejmenší. Připisování podle Čebyševa nám zaručuje získání nejmenší maximální odchylky mezi reálnou sejmutoú konturou a konturou vypočtenou metodou Čebyšev. Pro správné vyhodnocení je doporučen vysoký náměr bodů a eliminace odlehlých hodnot, případně filtrování nízkopásmovým filtrem.



Obr.7 Aplikace pomocí Čebyšev

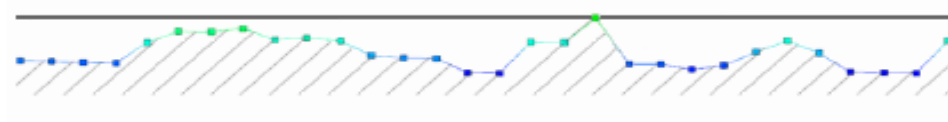
- **Element L1** – připisování Element L1 = principem výpočtu geometrického elementu je minimální součet absolutních hodnot odchylek. Vyhodnocení je nenáročné a výsledky jsou jednoznačné, připisování jako element L1 není citlivý na odlehlé hodnoty.
- **Výpočet jako minimálně opsaný, respektive maximálně vepsaný element** – dříve (MCCI – nejmenší opsaná kružnice & MICI – největší vepsaná kružnice). MCCI jedná se o nejmenší možnou nakreslitelnou kružnici okolo válcovitého profilu. MICI jedná se o možnou největší nakreslitelnou kružnici do daného otvoru vybraného profilu. Nová terminologie spojila tyto dvě staré metody do jedné. Principem je, aby žádný bod neležel mimo vytyčené kružnice, každý element musí být tak velký, jaké je bodové rozhraní nasnímaných bodů, ať už nejmenší opsaný nebo největší vepsaný. Použití této metody připisování je v případě tolerování hodnot pro určení

referenčních elementů, doporučuje se vysoký náměr hodnot nejlépe nízkopásmovým filtrem, protože tato metoda je postavená na základě extrémních hodnot.



Obr. 8 a) Aplikace pomocí výpočtu min. opsaný b) Aplikace pomocí výpočtu max. vepsaný

- **Výpočet jako tangenciální element** – jedná se o novou metodu, tangenciální element leží mimo snímaný materiál. Všechny nasnímané body leží mimo největší možný element (největší vepsaný), nebo všechny body leží uvnitř nejmenšího opsaného elementu. Pro využití této metody je zapotřebí vysoký náměr bodu, eliminace odlehlých hodnot a použití nízko pásmového filtru.



Obr. 9 Aplikace pomocí výpočtem jako tangenciální element

- Referenční kružnice – přiřazená kružnice umístěná k profilu kruhovitosti podle specifických konvencí, k nimž se vztahují úchytky kruhovitosti a parametry kruhovitosti [3],
- Vnější referenční kružnice nejmenší zóny – vnější kružnice největší zóny referenčních kružnic,

- vnitřní referenční kružnice nejmenší zóny – vnitřní kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- střední referenční kružnice nejmenší zóny – aritmetická střední kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic

Tab. 1 Použitelnost metod připasování

ELEMENT	GAUSS	MINIMUM	ELELMENT L1	OPSANÝ / VEPSANÝ	TANGENCIÁLNÍ
KRUŽNICE	X	X	X	X	X
KOULE	X	X	X	X	X
VÁLEC	X	X	X	X	X
KUŽEL	X	X	X	X	X
ROVINA SYMETRIE	X	X	X	X	X
2D PŘÍMKA	X	X	X		X
3D PŘÍMKA	X	X	X		
TORUS	X		X		
ELIPSA	X				
OBDÉLNÍK	X				
PODÉLNÝ OTVOR	X				
BOD	X				

### 2.4.1 Filtrování a eliminace odlehlých hodnot

Nelze srovnávat všechny softwary do jednoho. Každý výrobce CMM používá své vlastní softwary pro vytváření programů a vyhodnocení výrobku. Pravda je, že každá CMM firma s různým softwarem má trochu rozdílné možnosti pro vyhodnocení.

Je to zapříčiněno zařazením do typu výrobního procesu (ozubená kola, plastová výroba, karoserie automobilu, letecký průmysl, ...). Filtrování a eliminace odlehlých hodnot slouží k zpracovávání naměřených hodnot za předpokladu, že se vybrané hodnoty odeberou z dalšího vyhodnocení. Použití filtru pro měření 3D geometrické tvary lze především u skenovacího měření, nebo u bodového s maximální bodovou mezerou 1 mm a podmíněnou požadavkem minimálně 7 bodů na jednu vlnu kontury, to vše z důvodu požadavku velké četnosti bodů pro přesné vyhodnocení. Filtry mohou oddělovat profil vlnitosti elementu od povrchové drsnosti. S touto pomocí filtrů se přiblížíme skutečné naměřené hodnotě. Software Calypso od firmy ZEISS umožňuje

použití filtrace Gauss, spline, a 2RC. Na rozdíl od software Quartiz od firmy WENZEL, který používá filtrace Gauss, Čebyšev, min/max.

Tab. 2 Směrné hodnoty pro nastavení filtru a počet měřených bodů pro kontrolu kruhovitosti.

Průměr součásti [mm]	Jen tvar, standartní měření tvaru		Tvar a vlnitost, tvar včetně stop po chvění		Jen vlnitost, periodické složky profilu, např. velikost stop po chvění	
	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu	Mezní vlnové číslo [vln/ot]	Měř. body po obvodu
až 8	15	>105	50	>350	15-150	>1050
> 8 až 25						
> 25 až 80	50	>350	150	>1050	50-500	>3500
> 80 až 250	150	>1050	500	>3500		
> 250	500	>3500	1500	>10500	150-1500	>10500

## W/C

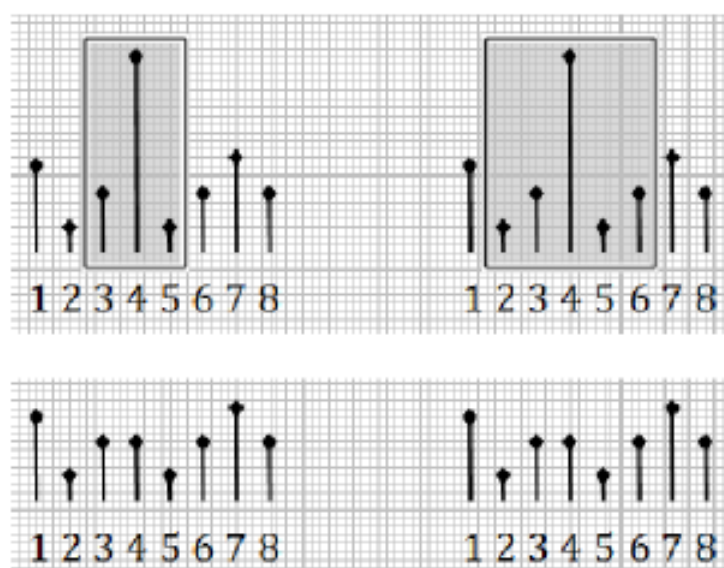
Při kruhu a válci je možné jako alternativu určit počet vln na obvodě. Z průměru prvku se odvozuje počet vln po obvodu.

## Medián

Volba Medián určuje šířku okna pro vybrání četnosti bodů okolo každého středového bodu, to je bráno v potaz pro rozpoznání chybné hodnoty a její eliminace. Šířka okna se určuje z leva do prava a vždy se posouvá o jednu hodnotu po celé délce obvodu. Velikost pole okna se může zvolit na hodnoty 3,5,7 a 9 (viz. tab. 3). Principem této funkce je nahrazení středové hodnoty v okně, hodnotou medián (hodnota medián není průměrná hodnota v okně). Když jsou za sebou dvě chybné hodnoty za sebou jdoucí, je zapotřebí použít šířku okna minimálně o velikosti 5 (viz. tab. 3).

Tab. 3 Šířka oken pro funkci medián [10].

Šířka okna	Počet po sobě následujících chyb
3	1
5	2
7	3
9	4



Obr. 10 Způsob eliminace odlehlých hodnot [10].

### Typy filtrů:

#### Nízkopásmový filtr

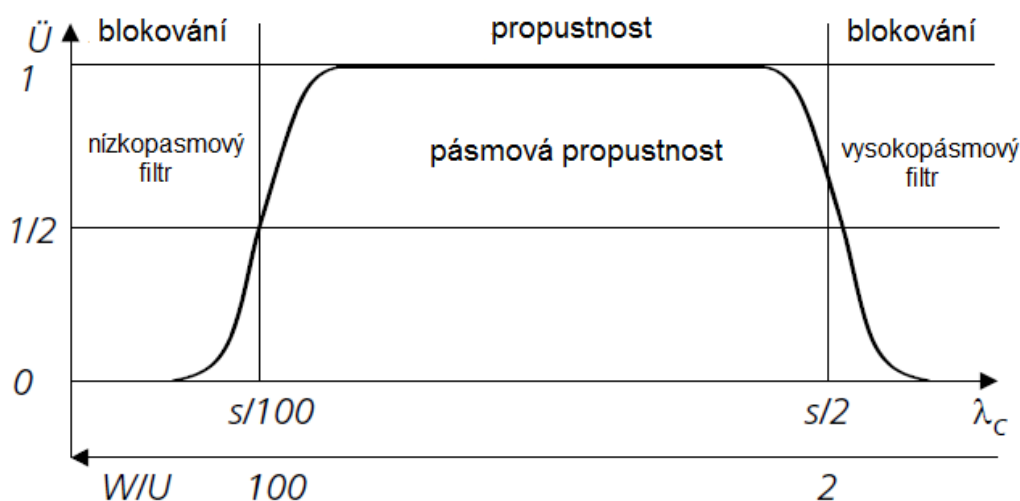
- Nízkopásmový filtr slouží k odbourání vlnitosti, dlouhovlnné podíly profilu, vliv drsnosti je zde potlačen. Prochází zde nízké frekvence. Průměrná linie křivky vznikne za předpokladu naměřených bodů ve stejném úseku tzv. dvojitá vlnová délka, každý jednotlivý úsek prochází vyhodnocením určitým počtem naměřených bodů. Tímto se určí profil pro výpočet parametru vlnitosti.

### Vysokopásmový filtr

- Vysokopásmový filtr slouží k odbourání vlnitosti, které jsou o vysoké frekvenci, jimiž prošel nízkopásmový filtr. Je zde stejně jako u nízkopásmového filtru odbourávána vlnitost a drsnost povrchu.

### Pásmová propustnost

- Pásmová propustnost je kombinace obou předchozích filtrů, dochází k eliminaci profilu vlnitostí i drsnosti povrchů, které přesahují přes hranice jednotlivých úseků uvedené meze.



Obr.11 typy filtrů [10]

## 2.4.2 Terminologie funkce filtrů

Jestliže není uvedeno jinak, všeobecné charakteristiky filtrů se řídí podle ISO 12181-2.

- Vlnový filtr působící na uzavřeném profilu, nesoucí určité rozhraní sinusových vln, ke kterému je podíl amplitudy výstupu k vstupu definovaný, pokud je zeslabení (např. redukování) podél letících vln mimo rozsah na jednom, anebo obou koncích [4],
- přenosná charakteristika filtru je označovaná množstvím, kterým je amplituda sinusového profilu zmírněná jako funkce jeho vlnové délky [4],



- vlnová hranice je vlnová délka aplikovaného filtru k vybrané obvodové přímce [4],
- přenosné pásmo pro profil kruhovitosti je sinusový profil vln, který je přenášen pomocí většího, jako je specifikovaného procenta filtrem definovaným pomocí hodnot vyšších a nižších vlnových hranic [4].

## 2.5 Normy spojené s kruhovitostí

ČSN ISO 4291 – Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření změn poloměru.

ČSN ISO 4292 – Metody hodnocení úchylek kruhovitosti; Měření dvou  
a tříbodovou metodou.

ČSN P ISO/TS 12181-1 – Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost –  
Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti.

ČSN P ISO/TS 12181-2 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost –  
Část 2: Operátory specifikace.

ČSN EN ISO 8062-1 Geometrické specifikace produktů (GPS) – Rozměrové  
a geometrické tolerance tvarovaných součástí – Část 1

ČSN EN ISO 5459 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování  
základny a soustavy základen.

ISO 11562 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová  
metoda – Metrologické charakteristiky fázově korigovaných filtrů.

ISO / DTS 16610-21 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Filtrace – Část 21:  
Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry

### 3 Analýza metod měření

„Odchyšky kruhovitosti jsou měřené v rovinách kolmých na osu kontrolované rotační plochy. Normou je stanovený nejmenší počet měření a poloha rovin měření v závislosti na délce válcové plochy a poměru délky a průměru [6].“

Kontrola přesnosti kruhovitosti je z hlediska funkčnosti a životnosti mimořádně důležitý aspekt. Přesné měření povrchu součásti zabezpečuje jeho spolehlivost. Např. valivá ložiska, nesprávné měření a vyhodnocení u povrchu valivých ložisek způsobuje snížení životnosti ložisek, zvyšuje v průběhu procesu jejich hlučnost a také zvýšenou náchylnost k předčasným funkčním poruchám.

V oblasti zdokonalování metod měření a vyhodnocení odchylek kruhovitosti je stále co nacházet, zákazníci nepolevují s přísnějšími požadavky na přesnost a zmenšující odchyšky tvaru. Vysoká přesnost tolerance tvaru při vyhodnocení kruhovitosti se udává v rozsahu od 0,1  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ . Výzkumné měření a vyhodnocení tvaru je považované za velmi užitečný proces zkoumání informací o využitelnosti tvorby povrchu a tvarů.

Měření a vyhodnocení odchylek kruhovitosti rozdělujeme do dvou skupin. Rozdělení závisí na zákazníkovi případně na konstrukční náročnosti měřené součásti. Není vždy zapotřebí použití laboratorních podmínek pro měření a vyhodnocení. V mnoha případech lze zákazníkovi jako dostačující protokol posloužit hodnoty z absolutních měřidel, nejedná se tedy o laboratorní podmínky s přesností v „ $\mu\text{m}$ “. Dílenské podmínky nám mohou také posloužit jako prvotní rozřídovací údaje k dalším operacím.

#### 3.1 Měřicí metody odchylek kruhovitosti

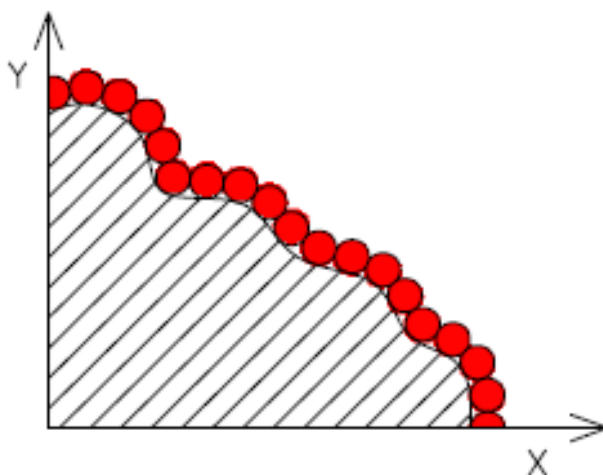
##### 3.1.1 Spojitá metoda

Jedná se o neustálý kontakt mezi snímacím elementem a měřenou součástí, v tomto případě nedochází k přerušení měřicí operace a ani k žádným odskokům měřicí sondy. Tyto metody rozdělujeme na skenovací, absolutní a relativní.

##### Skenovací metoda

Jedná se o neustálý kontakt snímacího dotyku s měřenou částí při plynulém měření kontur a geometrických prvků s maximální možnou hustotou bodů, hustota bodu je rozdílná dle výrobce a dle softwaru. Ve skutečnosti, kdy hovoříme o skenovacím procesu, snímací dotyk lehce odskakuje, aby zabránil tření sondy o materiál a tím docházelo k jeho znehodnocení a také k znehodnocení měřené součásti. Tyto odskoky jsou lidskému oku nezastížitelné, hovoříme o tisícinových délkách. Snímací dotek je v neustálém kontaktu s měřenou součástí, aby vytvořil co nejpřesnější a nejvíce skutečný tvar měřené částí. Tento tvar je kontrolován za pomoci CAD modelu nebo za pomoci výkresové dokumentace. Veškeré měření je předem předdefinované a měřicí cyklus opisuje trajektorii před snímaného tělesa. Skenovací metodu lze provést pouze u zařízení CMM, to s podmínkou podpory konstrukčního zařízení motorické skenovací hlavy. Není tedy pravidlo, že každé CMM je konstrukčně postaveno pro skenovací režim.

Skenovací metoda je v dnešní praxi velmi využívanou záležitostí. Využívá se metodou snímání povrchových řezů materiálu a nejrůznější průřezy součástí. Jedná se o přesnější měření než nespojitou metodou, jelikož se snímá celá délka obvodu měřeného sektoru pro vyhodnocení. Vyhodnocením získáme skutečný tvar, který následně můžeme porovnat s etalonovým vzorem, případně použití termografické mapy pro vyhodnocení odchylek kruhovitosti. Toto grafické vyhodnocení se stává v posledních letech trendem pro rychle a jasné zorientování v porovnání se skutečným stavem měřené součásti.



Obr. 12 vizualizace skenovacího modu [7]

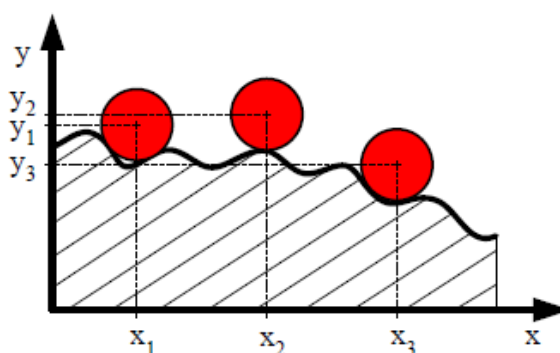
### 3.1.2 Nespojité metoda (diskrétní)

Jedná se o metodu využívanou pouze na souřadnicových měřicích strojích dále jen CMM. Tato metoda nevyžaduje žádné zvláštní příslušenství nebo jakoukoli zvláštní úpravu, stává se základní metodou všech softwarů montovaných do CMM. Nespojitou metodu lze použít jak pro standartní pevnou snímací hlavu, tak pro hlavu se skenovacím modulem. V rámci nespojité metody nedochází ke stálému kontaktu snímacího doteku s měřenou součástí.

#### Nespojitá metoda (diskrétní)

Nespojitou metodou získáváme informace měřením souřadnic jednotlivých bodů, které si zvolíme za pomoci 3D modelu nebo za pomoci osových souřadnic ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Měření kruhovitosti lze dosáhnout za pomoci nasnímaných minimálně třech bodů na kružnici povrchu. Následná operace vyhodnocení kruhovitosti se vypočítá ze středu kružnic a jejich průměru. Jedná se o měření přibližného tvaru profilu nebo polohy dané geometrické roviny. Měření je prováděno při zadaných omezeních sejmutí bodu, to je prováděno dle zkušenosti operátora, aby zaručil dostatečné množství sejmutých bodů v závislosti na efektivnosti časového sledu operace. Úkolem je získat za co nejkratší dobu, co nejpresnější podobu tvaru a profilu měřené součásti.

Nespojitá metoda má své klady, ale také zápory. Porovnáváme-li spojitou metodu s nespojitou, je zapotřebí si ujasnit i konstrukčnost zařízení. Pro nespojité měření je určena pevná hlava, která je přesnější než hlava se skenovacím modulem, pevná hlava dokáže unést i větší prodloužení díku a různé tloušťky. Není limitující vahou, ale ani délkou. Pracuje s menšími nejistotami měření.



Obr. 13 Nespojité metoda [7]

### 3.1.3 Obecné měření odchylek kruhovitosti

Kontrola kruhovitosti je prováděna třemi způsoby měření:

- Relativní metoda.
- Dvoubodová metoda.
- Tříbodová metoda.

Relativní metodou zjišťujeme stav měřené veličiny ke zvolené etalonové hodnotě. Při porovnání s absolutní metodou, ji můžeme určit za ekonomicky a časově nenáročnou metodu s výhodou menší nejistoty měření výsledků.

V měřicím přístroji se upevní zkoumaný vzorek do měřicí hlavy, po upevnění se stroj zapne a tím se uvede do rotačního pohybu rychlostí 200 – 500 ot. min.<sup>-1</sup>. Vznikající kmity odchylek kruhovitosti se přenáší elektrodynamickým snímačem, jenž prochází elektrickým odvodem, zaznamenává střední hodnotu měřených odchylek a následně jej zobrazí na obrazovce. Velkou výhodou těchto zařízení je použití pro hromadnou kontrolu díky své rychlosti měření. [7]

#### Dvoubodová metoda

Měření opakovatelné správnosti průměru v řadě libovolných řezů po obvodu kruhového tvaru (dvoubodová metoda) – jedná se o nejrychlejší měření kruhovitosti na úkor přesnosti, dvoubodová metoda je označována za nejméně přesnou kontrolu kruhovitosti.

Jedná se o nejčastější metodu používanou v praxi s univerzálními měřidly, při čemž se může jednat o měření nepravidelných tvarů a profilů s podmínkou sudého počtu hran. Pro výpočet skutečné odchylky se stanoví konstantní součinitel  $K_n=2$ , zároveň platí:  $2\alpha=\pi$ ,  $\beta=\pi/2$ ,  $\alpha=\beta$ . (obr. 14 a) [7]

#### Tříbodová metoda

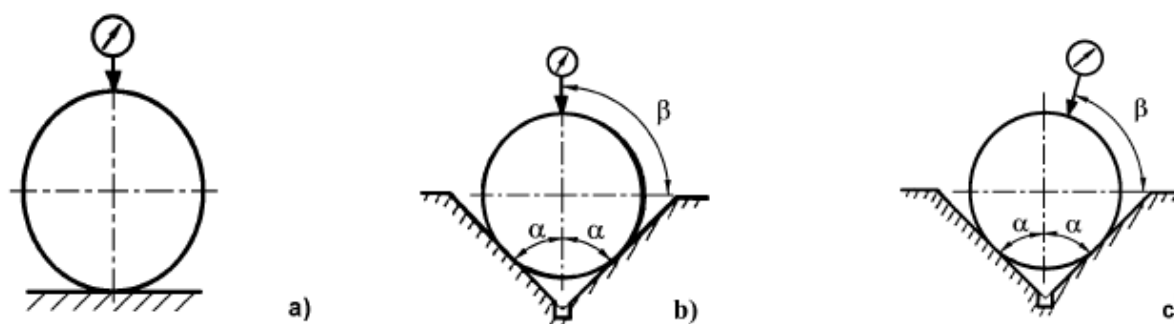
Vkládáním měřené součásti do prizmatu tvaru V s volným uložením. Změna tvaru a polohy měřené součásti je zaznamenávána měřicím dotykem úchylkoměru (tříbodová metoda), nerovnosti povrchu v daném řezu ovlivňují naměřené hodnoty.

### Tříbodová metoda symetrická

Nejčastěji se používá pro lichoběžníkový počet nepravidelnosti, je schopná k měření vnitřních, ale i vnějších profilů. Lze to také použít pro případ metody tříbodové, symetrické, obrácené, a to v případě, že měřený kus se během měření nebude hýbat, otáčí se pouze měřicí stroj, v tomto případě lze použít i velké průměry na měření kruhovitosti. Pro výpočet skutečné odchylky se stanoví konstantní součinitel  $K_n = (0 \leq K_n \leq 2,73)$ , mohou se realizovat jako přímé ( $\beta = -\pi/2$ ) (obr. 14 b) i jako obrácené ( $\beta = \pi/2$ ). Používají se úhly  $\alpha$ :  $30^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $60^\circ$ . [7]

### Tříbodová metoda nesymetrická

Jedná se o sloučení obou předcházejících metod, a to Tříbodové symetrické a Dvoubodové, veškeré jejich výhody byly spojeny do metody tříbodové nesymetrické, kdy jejich výhodou je měření všech případů odchylek kruhovitosti. Mohou být realizovány jak v přímé ( $0 \leq \beta < \alpha$ ,  $\alpha < \beta < \pi/2$ ), tak i v obrácené verzi ( $-\pi/2 < \beta < -\alpha - \pi/72$ ,  $-\alpha + \pi/72 < \beta < 0$ ). Metoda je zakreslena (obr. 14 c). [7]



Obr. 14 Relativní metoda  
dvoubodová metoda b) tříbodová metoda symetrická c) tříbodová metoda nesymetrická [7]

## **4 Měřicí technika pro hodnocení odchylky kruhovitosti.**

Než dojde na samotné měření, je zapotřebí součást nejprve správně vyrobit. Při výrobě se dbá na důsledky finálního tvaru, v praxi musí být kontrola prováděna jednak co nejrychleji,

ale zároveň výchozí hodnoty z měření musí být 100% správné. Měření odchylek kruhovitosti se může provádět od přesných laboratorních podmínek, kde probíhá měření na souřadnicových měřicích strojích nebo tomografii až po dílenské metody za pomoci mikrometru.

#### 4.1 Konvenční měřicí stroje

Konvenční přístroje fungují na principu spojité metody, a pracuje se s nimi v laboratorních podmínkách, proto měří s vysokou přesností a označujeme je jako kruhoměry. Takovéto měřicí přístroje vyhodnocují naměřené hodnoty pomocí softwaru na počítači. Jako příklad takovýchto přístrojů, které se používají na měření tvaru: Rondcom, Roundtest a další [10].



Obr. 15 Konvenční měřicí stroje Roundtest RA-100 Series 211-Roundness Measuring Instruments [7].

#### 4.2 Absolutní měřidla

V současnosti je běžné využívat při kontrole součástí co nejjednodušší praktiky. Za rychlé rozřídovací nástroje můžeme použít pomůcky, jako jsou pravítka a šablony. Už samotná výroba je nastavena tak, aby zhotovování součástí bylo co nejpřesnější. A z tohoto důvodu je zapotřebí použití měřicích přístrojů na provozech a dílnách. Nejčastěji se na provozech setkáme s tříbodovou metodou měření kruhovitosti, nebo měření na tzv. uhlových podložkách nebo obdobném systému. Dnešní doba už lehce oponuje tvrzení, že dílenské měřicí přístroje mají o řád menší přesnost, nebo že jsou méně přesné. Velkou výhodou konvenčních měřicích

přístrojů oproti laboratorním je jejich rychlé nasazení v provozu, případně rovnou na jakémkoli obráběcím centru nebo frézce.



Obr. 16 Posuvné měřidlo

### 4.3 Souřadnicové měřicí stroje

Prvotní mostové zpracování souřadnicových měřicích strojů, jak je již dnes známe, bylo vyvíjeno od padesátých let 20. století pro účel kompletního změření rozměrů a geometrických tvarů součástí. Samotný vznik souřadnicového měřicího stroje byl však mnohem dříve, a to ve dvacátých letech 20. století, kdy se jednalo o měřicí mikroskopy, přelom přišel roku 1970, kdy vznikly automatizované řízení za pomoci dotykových přístrojů. Prvotními zákazníky, pro které se souřadnicové stroje vyráběly a oblasti které dali popud inženýrům, byl letecký a automobilový průmysl. Schopnosti souřadnicové techniky předčily veškerá očekávání a jejich využití, bylo a také stále je velmi mnohostranné, precizní. Jedná se o obrovský přínos pro zajištění úseku kvality. Principem je zvolení libovolného bodu v prostoru a k němu se ostatní naměřené body dopasovávají za pomoci os X, Y, Z. Dopasování naměřených bodů v prostoru se provádí jednou z několika možných metod.

Dnešní výrobní firmy by se bez souřadnicových měřicích strojů těžko obešly, veškerá výroba je pod 100 % dozorem jak vizuálním, tak i měřicím, ať se jedná o 3D měřicí stroje za pomoci dotykové metody nebo optické sondy. Nároky na úsek kvality v každé korporaci se neustále zvyšují, jedná se i o tlak zákazníků. Zvyšování kvality souvisí i se snižováním tolerancí rozměrů výrobků a zvyšování přesnosti poloh a geometrických tvarů.



Každý výrobce dodává stroj osazený různým příslušenstvím dle požadavků na výrobu zákazníka. Příslušenstvím se rozumí jednotlivé měřicí sondy a systém nesoucí snímací zařízení, případně upravený software dle požadavku na obsluhu. Každý výrobce souřadnicového stroje si vytváří svůj vlastní software, v kterém probíhá veškerá komunikace, tato činnost se nazývá „programovací jazyk“. Každý software je tímto odlišen od konkurence v rámci obsluhy a tvorby nových programů, ty lze vytvářet dvěma způsoby on-line/off-line. Rozdíl mezi těmito způsoby je v připojení ke stroji. Tvorbu nových programů lze provádět mimo laboratoř působností měřicího stroje za předpokladu off-line klíče napojeného na jakýkoliv jiný počítač, notebook.

Samotným principem měření a vyhodnocení výsledku je porovnávání, to je možné provádět za pomoci CAD modelu v 3D simulaci, nebo s výkresovou dokumentací především výrobním výkresem. Vyhodnocení naměřených hodnot vyplývá z porovnávání dvou hodnot, referenční etalonová hodnota (jedná se jmenovitý rozměr na výkrese/CAD) ke skutečné naměřené hodnotě (naměřená hodnota součásti). Výsledky měření lze vyhodnotit grafickou nebo datovou formou, tuto formu protokolu si určuje zákazník.



Obr. 17 Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Crysta Apex C9106

## **Konstrukce souřadnicových měřicích strojů (CMM)**

Konstrukce souřadnicových měřicích strojů dále jen CMM lze rozdělit na čtyři konstrukční typy: stojanový, portálový, výložníkový, mostový. Jednotlivé typy mají své výhody a nevýhody. Je pravidlem, že čím větší souřadnicový stroj, tím je méně přesné měření a větší nejistota měření. Dnes už není pravidlem, že CMM lze užívat jen v laboratorních podmínkách. Dnešní doba umožňuje používání kontroly rozměru i v dílenských prostorech, případně přímo v obráběcích strojích. V praxi se s touto metodou můžeme setkat čím dál víc. Zprostředkovat CMM do výrobní linky je neekonomičtější, ale technicky náročnou záležitostí. Všechny vyráběné součásti budou podléhat 100 % kontrole, jde o úplný přehled rozměrů a tvarů vyráběných dílů. Nedochází k nadměrné zmetkovitosti jak v případě měření náhodně vybraných kusů v časovém nebo množstevním cyklu. Za pomoci 100 % kontroly lze v čas vyhodnotit nevhodné součásti a lze zabránit dlouhodobé časové zmetkovitosti, následné kontrole jednotlivých kusů, pro nalezení bodu zvratu od akceptovaného výrobku pro zmetkovitý. Konstrukce CMM proto je důležitý aspekt, který rozhoduje o volbě nákupu. Dobrá přístupnost a přesnost měření.

### Výložníkový konstrukční typ

Výložníkové typy aneb CMM s horizontálním ramenem se doporučují pro měření dlouhých, a ne příliš širokých součástí, dlouhá měření v ose X, zároveň nevýhoda krátké vzdálenosti osy Y, nebo lze použít dva stejné stroje stojanového typu postavené proti sobě. Tento typ dvou strojů se uplatňuje v automobilovém a leteckém průmyslu. Výhodou je výborná přístupnost k měřicímu prostoru. (Obr. 20)

### Stojanový konstrukční typ

Stojanové typy jsou charakteristické svou nejlepší přesností ze skupiny souřadnicových měřicích zařízení. Jejich přesnost je limitující na úkor měřicího prostoru. Tento typ se využívá pouze v laboratorních podmínkách pro malé rozměry měření. (Obr. 19)

### Portálový konstrukční typ

Portálová konstrukce je nejběžnějším a nejrozšířenějším konstrukčním typem ze skupiny souřadnicových měřicích strojů. Konstrukce je vyráběna dvěma způsoby, prvním způsobem je konstrukce s pevným portálem, nebo druhá varianta s pohyblivým portálem. První varianta s pevným portálem, má pohyblivý stůl a tužší konstrukci, která zaručuje přesnější

měření, tuto přesnost neztrácí ani při větších rozměrech. Druhá varianta s pohyblivým portálem, má nehybný stůl. Veškeré měřené součásti jsou limitovány svou velikostí měřicího stroje. (Obr. 18)

### Mostový konstrukční typ

Mostová konstrukce je určená pro nadrozměrné rozměry, tyto hodnoty mohou být v ose X až délkově 24 m dlouhé. Přesnost měření je u tohoto typu nejmenší z celé řady souřadnicových měřicích strojů, to je způsobeno velkými rozměry pojezdových drah. Nejčastěji se využívají v automobilovém a leteckém průmyslu. (Obr. 21)



Obr. 18 Portálová konstrukce – Mitutoyo Crysta Apex C9106



Obr. 19 Výložníková konstrukce – Stojanová konstrukce – Wenzel Smart CMM



Obr. 20 Dea Bravo HD [8]

Obr. 21 Mostová konstrukce – Leitz PMM-F  
30.20.10/16 [8]

#### 4.3.1 Základní prvky CMM

Konstrukce CMM je různá, ale základní prvky jsou vždy stejné, za základní prvky CMM se považuje: rám, stůl, portál, stojan, pinola, most (podle typu konstrukce CMM).

##### Rám

Nejčastěji je vyráběn jako svařenec, a to z důvodu plnění přísných norem pro tuhost rámu v dynamickém zatížení. Ve výjimečných případech, kdy se jedná o nadrozměrné velikosti CMM, není rám svařován, ale je nahrazen vlastní základovou deskou. Základové desky jsou řádně upevněné a zkaližované k podlaze. Tento typ rámu se zabudovanou základní deskou do podlahy lze vidět v automobilovém průmyslu při měření karoserii v celku, případně v leteckém průmyslu.

##### Stůl

Stůl je vyroben z masivní kamenové desky, a to z žuly nebo případně granitu. Na veškeré opracování je kladen velký důraz na přesnost povrchu, úchytky rovinnosti bočních částí pro posuv sloupu případně mostní konstrukce jsou speciálně broušeny a opracovávány na hodnotu až 0,002 mm/m, lapovací metodou lze dosáhnout hodnot 0,005 mm/m. Plocha určená k upevnění měřeného dílce, musí být absolutně rovná. Měřené prvky mohou

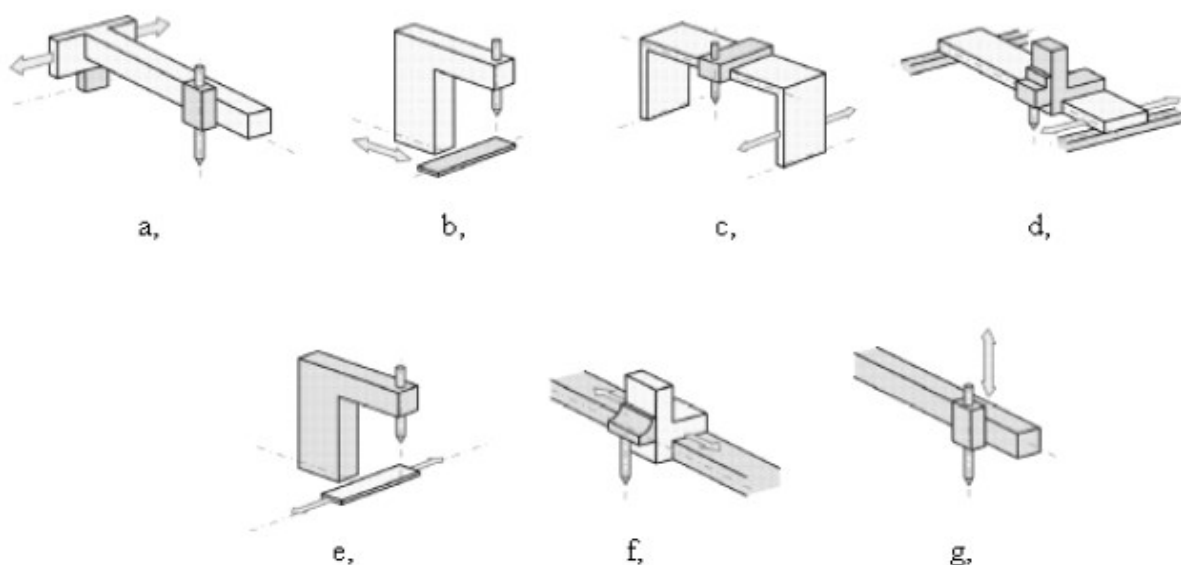
byť upevněny do sklíčidel, které jsou přimontovány k desce pomocí upevňovacího šroubu nebo samotný měřený díl je upevněn k desce. Při větších rozměrech a zajištěné nehybné stálosti lze v určitých případech měřený díl nechat volně ležet, jedná se o hmotnostně těžší součásti. Pracovní deska musí zachovat: odolnost proti korozi, objemovou stálost, vysokou životnost a trvanlivost, minimální tepelnou roztažnost.

### Pinola

Pinola se může vyrábět ve dvou materiálových provedeních, a to ocel nebo přírodní kámen. Konstrukční provedení pinoly je vertikální případně horizontální, pro pinolu jsou charakteristické čtvercové nebo kruhové průřezy. Každá varianta výběru závisí na volbě zákazníka. Z konstrukčního hlediska je horizontální poloha velmi náročná na konstrukci stroje z důvodu velké zátěže na ohyb z vlastní hmotnosti, ke které je připočtena hmotnost snímací hlavy s osazenými dotyky. K zamezení této deformace pinoly slouží vyvažovací zařízení, které minimalizuje chyby způsobené rozdílnou délkou vysunutí pinoly.

### Mostní konstrukce, sloupy a portály

Z konstrukčního hlediska je snaha o dosažení co nejlehčí, ale zároveň dostatečně tuhé části CMM, jsou tyto části měřicího stroje vyráběny z hliníkových slitin nebo keramiky, z důvodu zamezení vzniku dynamických sil. Dynamické síly jsou velmi nežádoucí vliv, který nám ovlivňuje přesnost měřicího stroje.



Obr. 22 Části souřadnicových měřicích strojů. [9]

a) výložník, b) sloup, c) most, d) portál, e) posuvný stůl, f) suport, g) smykadlo

#### 4.3.2 Vedení CMM

Základem celého měřicího stroje je snadný a lehký pohyb pohyblivých částí, jedná se o jednu z nejcitlivějších částí stroje. Je nezbytně důležité, aby posuv probíhal s naprostou lehkostí, maximální přesností i s minimální rychlostí, tyto všechny aspekty činí vodící centrum nejpresnější stroj. Hybné části stroje jsou osazeny na vedení, na které je kladen důraz s co nejmenším třením, minimálním opotřebením a zároveň maximální tuhostí. [7]

Vedení a pohyb souřadnicového stroje v jednotlivých osách jsou (X, Y, Z):

- Vzájemná kolmost pinoly k portálu,
- Rovinnost pinoly se sloupem (dle konstrukce CMM)
- Přímočarost
- Minimální až nulová vůle
- Stálost rozměru
- Minimální odpor při posuvu stroje

Veškerý pohyb je na stroji zajištěn za pomoci kluzného uložení, valivého uložení, aerostatické uložení. Jednotlivé typy uložení jsou specifické pro svou konstrukční oblast.

### Kluzné uložení

Kluzné uložení se používá na kovových plochách nebo konstrukčně menších souřadnicových strojích s vyšší třídou přesnosti. Velkou výhodou je tuhost kluzného uložení, kvalita vedení má přímou úměrnost s přesností měření. Čím kvalitnější je průběh vedení stroje, tím přesnější bude naměřená hodnota. V dnešní době se za nevýhodu považuje neustálá pracná údržba formou mazání kluzného uložení. Proto je tento způsob použití doporučován jen pro malé rychlosti posuvu.

### Valivé uložení

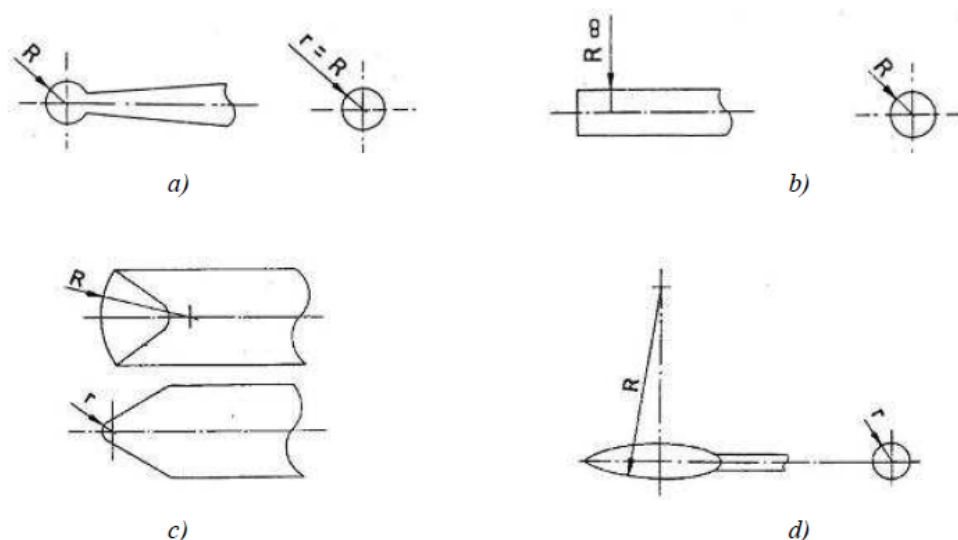
Valivé uložení se považuje za nejjednodušší řešení přesné kladky. Dokonalejší jsou už jen valivá hnízda, které se používají u většiny souřadnicových strojů, až na portálové, kde jsou aerostatická (vzduchová) ložiska.

### Aerostatické uložení

Aerostatické uložení = jde o uložení na vzduchových vacích o tloušťkách 4 až 8  $\mu\text{m}$ . Tento vzduchový vak zaručuje nejpresnější a nejlepší posuv jaký jen je možno umístit na CMM. Aerostatické uložení nelze umístit na všechny portálové souřadnicové stroje, pro tento systém je limitující váha. Výhody tohoto typu uložení spočívají především v minimálním odporu při posuvu a tím spojený trhavý pohyb, stroj pracuje plynuleji a bez otřesu a chvění při posuvech, všechny faktory mají přímou úměrnost na přesnost měření.

#### **4.3.3 Snímací dotyky**

Snímací dotyky rozlišujeme dle tvaru a materiálu. Každý druh snímacího dotyku je určen pro jiný typ materiálu měřené součásti, případně pro odlišné způsoby měření (bodová metoda, skenovací metoda).



Obr. 23. Druhy měřicích dotyků a) kulový b) válcový c) klínový d) kapkový. [7]

### Snímací dotyky rozdělujeme

- Kulové,
- Válcové,
- Klínové,
- Kapkové.

Měřicí přístroje, pracující s absolutními metodami se mohou pyšnit velmi vysokou přesností při měřicích operacích. Jsou používány výhradně v metrologických laboratořích z důvodu přesnosti a preciznosti měření, kde je ideální teplota a lze přesně centrovat měřicí kus. Tato metoda není vhodná pro hromadnou sérii měření odchylek kruhovitosti. [7]

### Rozdělení materiálu snímacího dotyku

Materiály pro snímací dotyky musí splňovat ty nejpřísnější kritéria, co se vlastnosti týče. Musí být otěru vzdorné a zajišťovat tepelnou stálost a vodivost. Materiál snímacího dotyku lze kombinovat podle potřeby měření, nebo podle typu materiálu měřeného dílu. Tím se zaručí přesné měření bez znehodnocení snímacího dotyku. Jako každý materiál podléhají i tyto



materiály chemickým reakcím mezi jednotlivými materiály. V některých případech může docházet k tzv. abrazivnímu nebo adheznímu otěru.

## **Materiály**

- **Rubín**

Jedná se o průmyslový standard, který si Rubín vybudoval jako jeden z nejtvrdějších a nejuniverzálnějších materiálů snímacích doteků. Výhody jsou především v dokonalém hladkém povrchu, vysoké odolnosti otěru a vynikající pevnosti v tlaku. Rubín není doporučován pro metody skenování na materiály litinových součástí z důvodu vzniků abrazivního otěru a také pro hliníkové součásti, kde vzniká adhezivní otěr. (obr. 16 a) [7]

- **Nitrid křemíku**

Vlastnostmi velmi podobný Rubínu, taktéž velmi tvrdý a odolný materiál, který lze při extrémním leštění zlehka dosáhnout hladkosti Rubínového doteku. Jeho hlavní výhodou je, že nevzniká adhezní otěr při skenovacím modu na hliníkové součásti. Velká nevýhoda je nepoužitelnost na ocelové materiály, kdy v kontaktu při skenování vzniká abrazivní otěr. (obr. 24 b) [7]

- **Zirkonium**

Oxid zirkoničitý je velmi pevným keramickým materiálem s podobnými vlastnostmi v odolnosti a pevnosti jako Rubín. Jeho největší výhodou je samotný povrch, díky němu lze při litinových součástech, Oxid zirkoničitý používat na agresivní výkonné skenování. (obr. 24 c) [7]

- **Diamant**

Diamant je ze všech materiálů, co se týče vlastností nejlepší. Díky jeho chemické konzistenci je nejpresnější a také dokáže svou hladkost posunout na naprosté minimum. Je ho vhodné použít na všechny druhy materiálu jak při skenovacím modu, tak i bodově. (obr. 24 d) [7]



Obr. 24 Rozdělení materiálu hrotů a) rubín b) nitrid c) zirkon d) diamant. [7]

## 5 Experiment

Experimentální část diplomové práce byla vytvořena pod odborným vedením Ing. Lenka Čepová, Ph.D. na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, na stroji CMM od firmy Wenzel, typového označení WENZEL LH 65 X3M PREMIUM s operačním software „Metrosoft QUARTIZ R6“. Účelem experimentu bylo měření vlivu vybraných parametrů na odchylku kruhovitosti při kontaktním způsobu měření.

Kapitola obsahuje nákresy měřené součásti, popis použitých zařízení, grafické a statistické vyhodnocení výsledků. Tato část nám přináší poznatky z analýzy vlivu použitelnosti vhodného typu filtrace pro vyhodnocení odchylek kruhovitosti. Jednotlivé části na sebe velmi navazují. V praxi při rozdílných teplotách materiálů, které vybočují z ideální teploty což je  $19,5\text{ }^{\circ}\text{C} \div 20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  mohou nastat neadekvátní vyhodnocení, díky zkresleným hodnotám vlivu tepla. Výrobci doporučují dotyky, které jsou vhodné na měření různých materiálů, ale volbu dotyku si volí každý operátor CMM sám na základě praktických zkušeností. Případně osoba programující software. Důležité je brát v potaz geometrii měřeného dílce (popřípadě měření dutiny či závitu), ne každou sondou (typu, druhy, velikosti snímacího dotyku) jde vše měřit.

### 5.1 Výroba měřené součásti

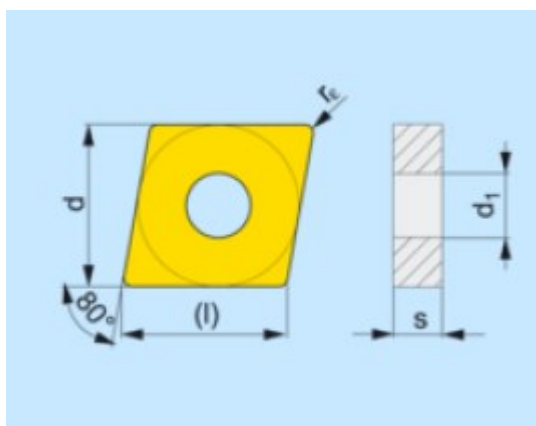
Obrobek na experiment, jedná se o monolitní kus, který byl soustružen na stroji DMG Mori Seiky NLX 2500/700. Nožem typu PCLNR 2525M 12 (Obr. 25), břitová destička typu CNMG 120408E-M (Obr. 26) obrobek byl soustružen na jmenovitý rozměr 84 mm. Řezné podmínky pro zhotovení drsnosti jsou uvedeny v Tab. 4. Poslední krok byl směřován k očištění obrobku od nečistot, mastnot a následně se provedla konzervace, která zabraňuje korozi.

Tab. 4 Řezné podmínky

Požadovaná drsnost [μm]	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm]	$a_p$ [mm]
Ra 1,52	300	0,1	1,5



Obr. 25 Obráběcí nůž s břitovou destičkou



Obr. 26 Břitová destička [11]

## 5.2 Materiál pro experiment

Pro diplomovou práci, na analýzu vlivu měření vybraných parametrů pro odchylku kruhovitosti byl vybrán materiál 12 050.1, uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení ČSN 41 2050 – válcovitého tvaru. Vlastnosti materiálu použitého vzorku jsou zapsány níže viz. (Tab. 5)

Tab. 5 Vlastnosti materiálu

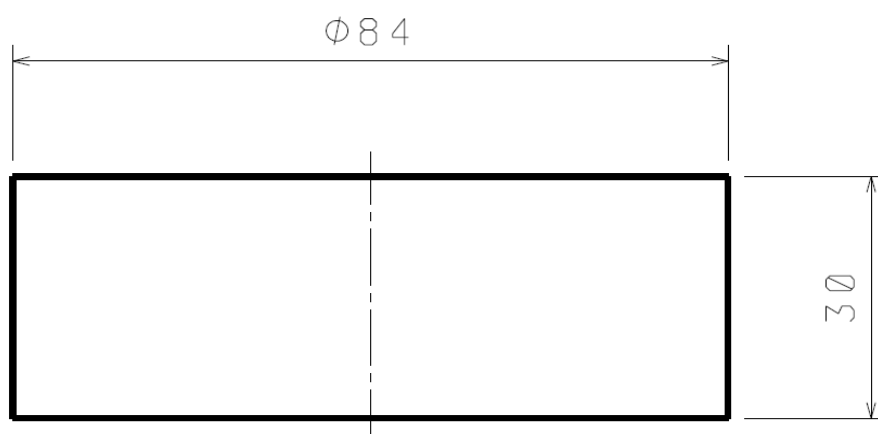
	Jednotky	12 050.1
Kluzu ( $R_{p0,2}$ )	MPa	min. 325
Mez pevnosti ( $R_m$ )	MPa	min. 540
Tažnost ( $A_5$ )	%	min. 17
Tvrdost	HB	max. 225
Modul pružnosti v tahu ( $E$ )	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku ( $G$ )	GPa	79

Tab. 6 Mechanické vlastnosti

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle ČSN	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040
aktuální stav	0,51	0,69	0,25	0,15	0	0,12	0,023	0,017



Obr. 27 Ustanovená měřená součást ve sklíčidle



Obr. 28 Schéma měřené součásti

### 5.3 Měření experimentu

Před veškerým měřením jakéhokoli způsobu je zapotřebí důkladně očistit (např. lihem) měřenou součást ať dojde k zbavení nečistot a mastnot na měřeném povrchu a tím se minimalizují nežádoucí nepřesnosti při měření. Důležité je si pořádně upevnit měřicí součást ať nedojde k jeho posuvu, upevnění nesmí mít žádnou vůli, aby měření bylo smysluplné. Pro upevnění měřicí součásti se používá sklíčidlo nebo speciální stavebnice pro upevnění měřeného dílce. Před novým měřením je nutná kalibrace, a to jak referenční koule, tak jednotlivých dotyků. [7]

Referenční koule znamená, že se jedná o kouli s konstantní křivostí a průměru  $d_1 = 24,99900$  mm (obr. 30), bez tohoto referenčního zařízení nelze nikdy měřit dlouhodobě. Každé měřicí zařízení je potřeba jednou za čas kalibrovat pomocí buď referenčních složek nebo etalonových desek či kalibračních center, toto rozdělení je nepochybně dle konstrukce měřicího stroje a použití. Referenční koule umožňuje kalibraci do  $180^\circ$  po celé polokouli. Jde zde pouze o natočení indexové hlavy a dotyků. Cílem kalibrace je zjistit průměr kuličky, délku snímacího systému (až po střed otočné hlavy). Referenční koule může být v kterémkoliv místě měřicího prostoru, ale stroj musí znát její přesnou polohu a orientaci. Pozici koule určíme jedním regulérně nakalibrovaným dotykem. [7]

Kalibrace dotyků by se měla provádět před každým novým měřením a nutností je kalibrovat po každém nárazu sondy o měřenou součást. Kalibrace u software Metrosoft QUARTIZ R6 se dá provádět třemi způsoby. [7]

- **Manuálně** – Dotečky se kalibrují na rovníku a pólu pouze bodovou metodou o 5–6 bodech. [7]
- **Poloautomat** – Natočení hlavy do požadované pozice následně se vyvolá funkce kalibrace a sejme se jeden bod na povrchu koule. Nezapomenout uložit snímací systém pod dané uložení do tabulky. [7]
- **Plný automat** – Vychází z jedné nakalibrované pozice dotyku. Označení polohy požadované ke kalibraci, odjedeme do bezpečné pozice. [7]

U otáčecí indexové hlavy Renishaw PH 10M, která byla používána pro experimentální část bakalářské práce, se každé odchýlení hlavy od její aktuální polohy musí nakalibrovat. Každý úhel, který je zapotřebí k měření je potřeba zkalibrovat. Je naprosto vyloučeno měřit bez zkalibrovaného dotyku. [7]

## 5.4 Chyby měření

Každé měření je zatížené chybou. Jedná se o rozdíl mezi pravou (skutečnou) hodnotou a naměřenou hodnotou měřené veličiny. Tento rozdíl se nazývá absolutní chyba měření.

$$\varepsilon = y - x_0 \quad (2.36)$$

Kde:

- $\varepsilon$  - absolutní hodnota
- $y$  - naměřená hodnota
- $x_0$  - pravá (skutečná) hodnota

**Relativní chyba** – jedná se o poměr absolutní chyby a pravé (skutečné) hodnoty měřené veličiny.

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100 \text{ [ \% ]}$$

### Chyby vznikají vlivem:

- Prostředí – teploty a vlhkosti
- Měřící osoby – kvalifikace, zkušenost
- Měřící metodou
- Měřidla – chyba umístění, vliv tření

**Členění chyb:**

- Dle časové závislosti: statické, dynamické
- Dle možnosti vyloučení: odstranitelné, neodstranitelné
- Dle způsobu výskytu: hrubé, systematické, náhodné

**Hrubé chyby** – jedná se o nejčastěji chyby způsobené na měřícím stroji, měřící osobou, měřidlem, chybou zapsání výsledku, špatným zpracováním výsledků. Tyto hodnoty se vylučují ze souborů výsledku a stávají se tak pro nás nepoužitelnými. Dokud se chyba neodstraní, nelze pokračovat v měření.

**Systematické chyby** – jedná se o chyby vznikající nevhodným přitlakem měřidla, špatným zacházením (nevynulování měřidla), nepřesným opotřebením přístroje. Tyto hodnoty zatížené systematickou chybou můžeme použít za předpokladu jejich nalezení a opravy. Lze je použít ke korekci naměřených hodnot, mají-li konkrétní znaménko a hodnotu. Systematické chyby neznáme jsou brány jako chyby náhodné, protože nemají konkrétní hodnotu a zahrnují se do nejistot měření.

**Náhodné chyby** – jedná se o chyby způsobené náhodným charakterem co do velikosti a směru působení. Nejčastěji ve strojírenství mají náhodné chyby Gaussovo rozdělení hustoty pravděpodobnosti výskytu. Určení této chyby se provádí odečtením střední hodnoty od výsledné hodnoty měření.

## **5.5 Maximální přípustná chyba MPE (Maximum Permissible Error)**

Jedná se od údaje, s jakou přesností dokáže zařízení měřit, akreditovaný subjekt uvádí v kalibračním protokolu rozšířenou nejistotou měření  $U$ . Stanovená měřící zařízení podléhají ověření a nestanovená měřidla podléhají kalibraci v daném periodickém čase. CCM výrobci udávají dle normy ČSN EN ISO 10360 dovolené chyby, které jsou v této normě charakterizovány.



**MPE<sub>E</sub> Maximální dovolená chyba měření délek (Maximum Permissible Error for size measurement)**

Kalibrace odchylky délkových rozměrů se provádí s pomocí koncových měrek nebo stupňovitých koncových měrek. Měření se provádí v 7 pozicích a 5 různých délek v rámci celého rozsahu stroje, tahle činnost se opakuje 3x. Následně se naměřené hodnoty porovnávají s hodnotami kalibrace.

**MPE<sub>P</sub> Maximální dovolená chyba snímání (Maximum Permissible Probing Error)**

Jedná se o kalibraci dotykové odchylky, která se měří za pomoci referenční koule o průměru 10 až 50 mm se zanedbatelnou tvarovou úchylkou. Měření se provádí na 25 místech. Z naměřených 25 bodů se následně vypočte tzv. Gaussova vyrovnávací koule. Radiální vzdálenost od vyrovnávací kuličky nesmí překročit danou specifikaci která zní: kladná konstanta = maximální dovolené chybě snímání.

**MPE<sub>THT</sub> Maximální dovolená chyba při skenování (Maximum Permissible Scanning Probing Error)**

Jedná se o kalibraci dotykové odchylky, která měří za pomoci referenční koule o průměru 25 mm se zanedbatelnou tvarovou úchylkou. radiální vzdálenost od vyrovnávací kuličky nesmí překročit danou specifikaci která zní: kladná konstanta = maximální dovolená chyba při skenování.

## 5.6 Požítá zařízení pro měření

Měření bylo prováděno při teplotě  $20,0\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ .

### Parametry CMM Wenzel LH 65 – X3M Premium (se zvýšenou přesností):

#### Měřicí prostor:

X = 650 mm

Y = 1000 mm

Z = 500 mm

### Nejistota měření MPEe podle ISO 10360-2 v provedení X3M Premium:

MPEe =  $1,6 + (L/350)\text{ }\mu\text{m}$

MPEp =  $1,6\text{ }\mu\text{m}$

### Nosnost granitové desky:

500 kg

### Snímací systém Renishaw:

### Motorická indexovatelná hlavička:

PH 10M

### Měřicí skenovací sonda:

SP 25 M – modul 1

MPEthp =  $2,2\text{ }\mu\text{m}$  (SP25)

### Software:

Metrosoft QUARTIZ R6

### Dotyk:

1001 – průměr kuličky 2 mm s přesností po kalibraci  $0,0002\text{ mm}$

Dotyk 1001 má ocelový dřík o délce 35 mm, ten je osazen rubínovou kuličkou, která slouží jako snímací dotek.



Obr. 29 Motorická indexová hlava  
Renishaw PH10M



Obr. 30 Měřicí dotyk 1001



Obr. 31 Referenční koule

## 5.7 Statistické vyhodnocení

Použité vzorce:

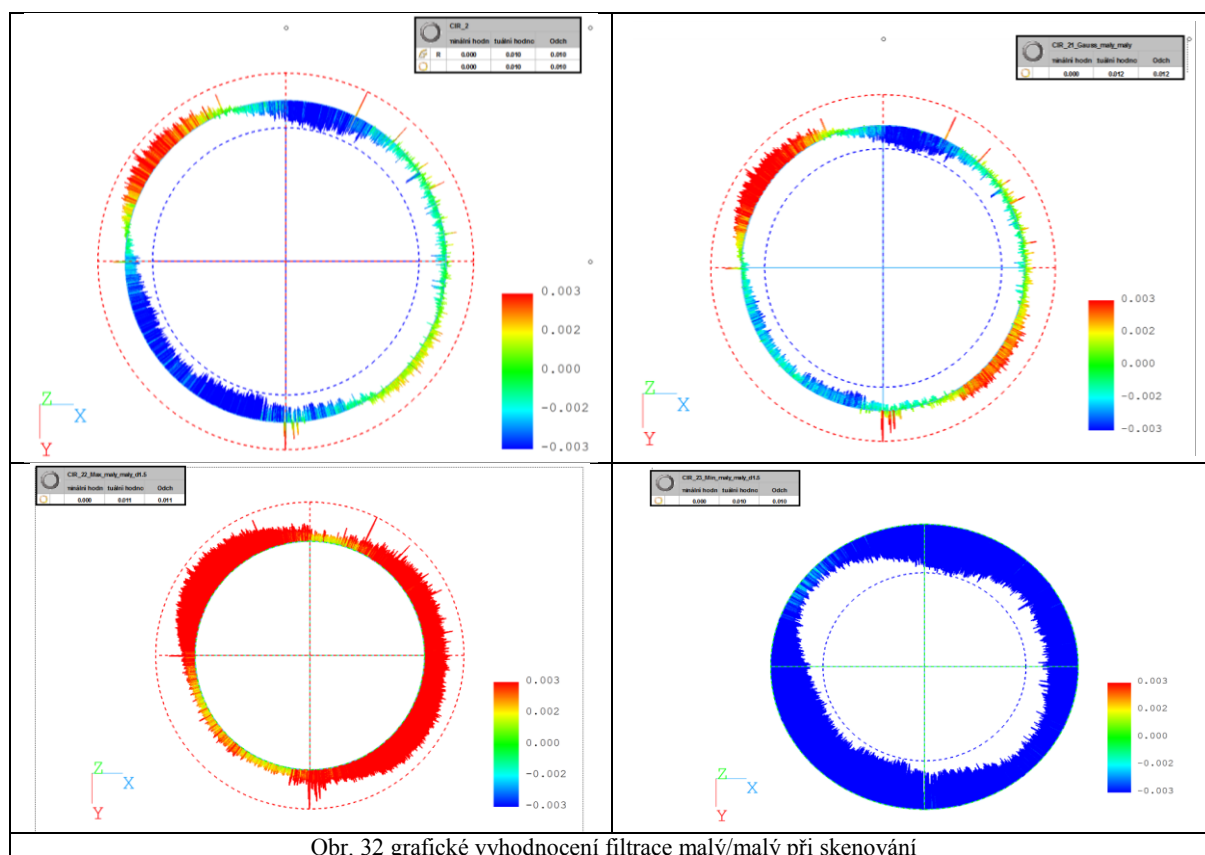
Výpočet průměru naměřených hodnot:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

- $\bar{x}$  je průměr hodnot ze souboru, [mm]
- $x_i$  jsou jednotlivé naměřené veličiny, [mm]
- $n$  je počet měření. [-]

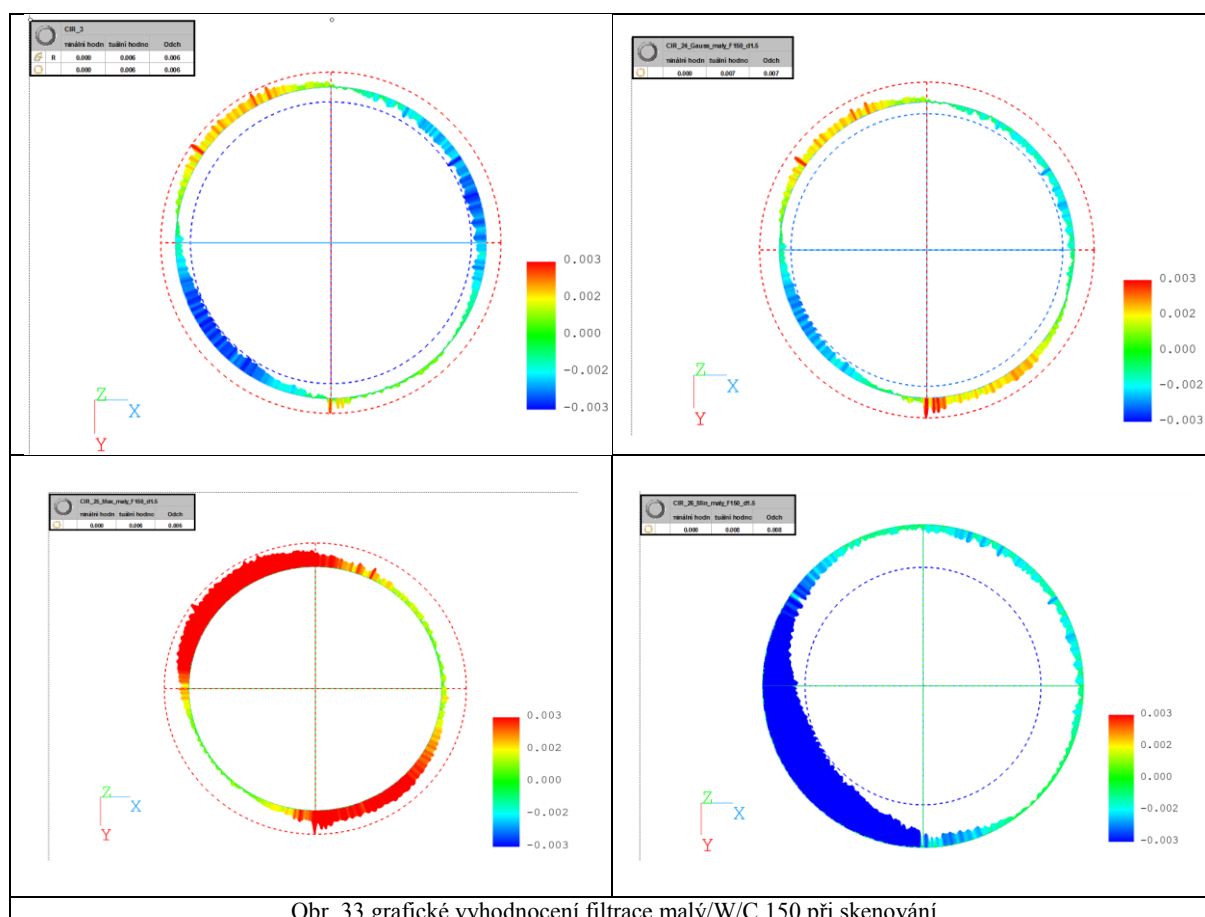
Výpočet rozpětí naměřených hodnot: **Roz. = Max. – Min.**

- Roz. je rozpětí hodnot ze souboru, [mm]
- Max. je maximální hodnota ze souboru, [mm]
- Min. je minimální hodnota ze souboru. [mm]

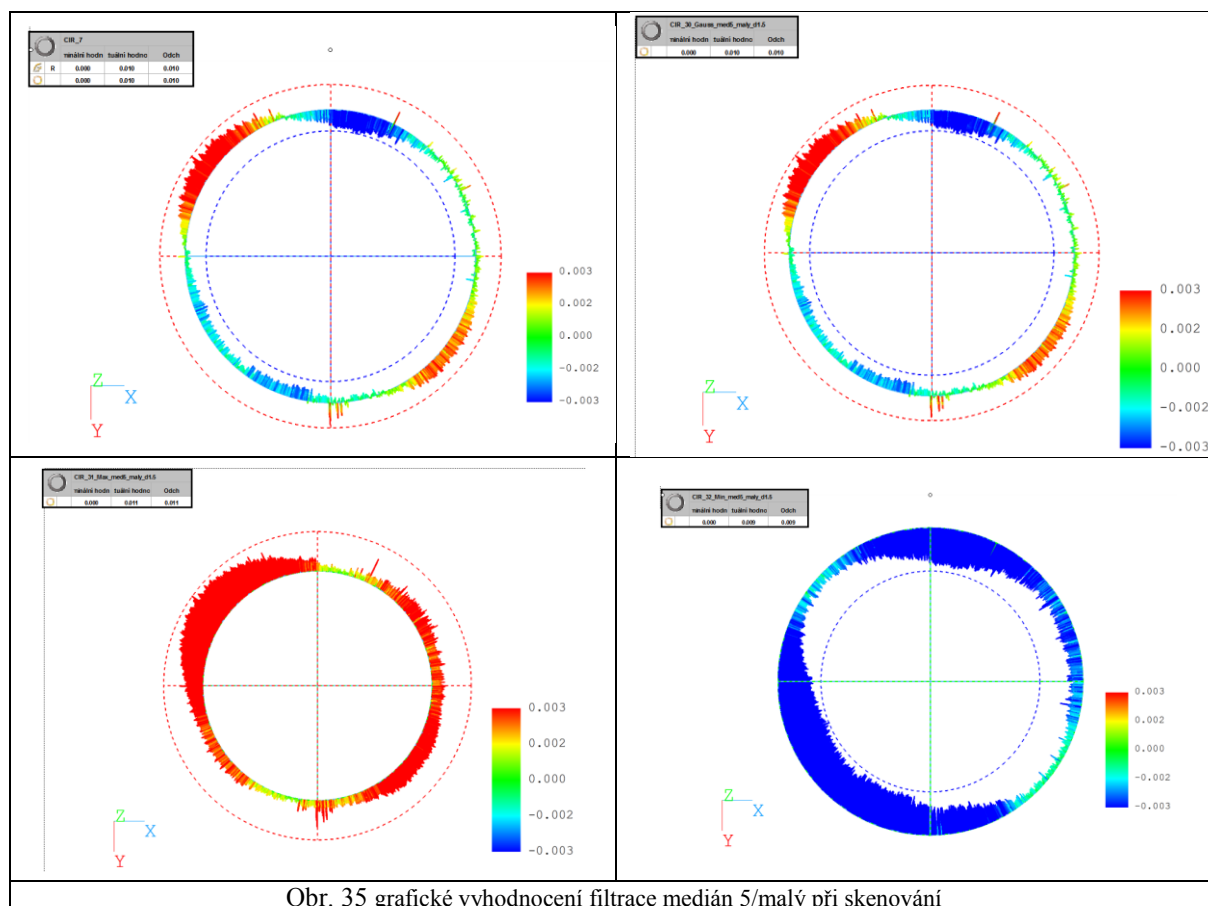
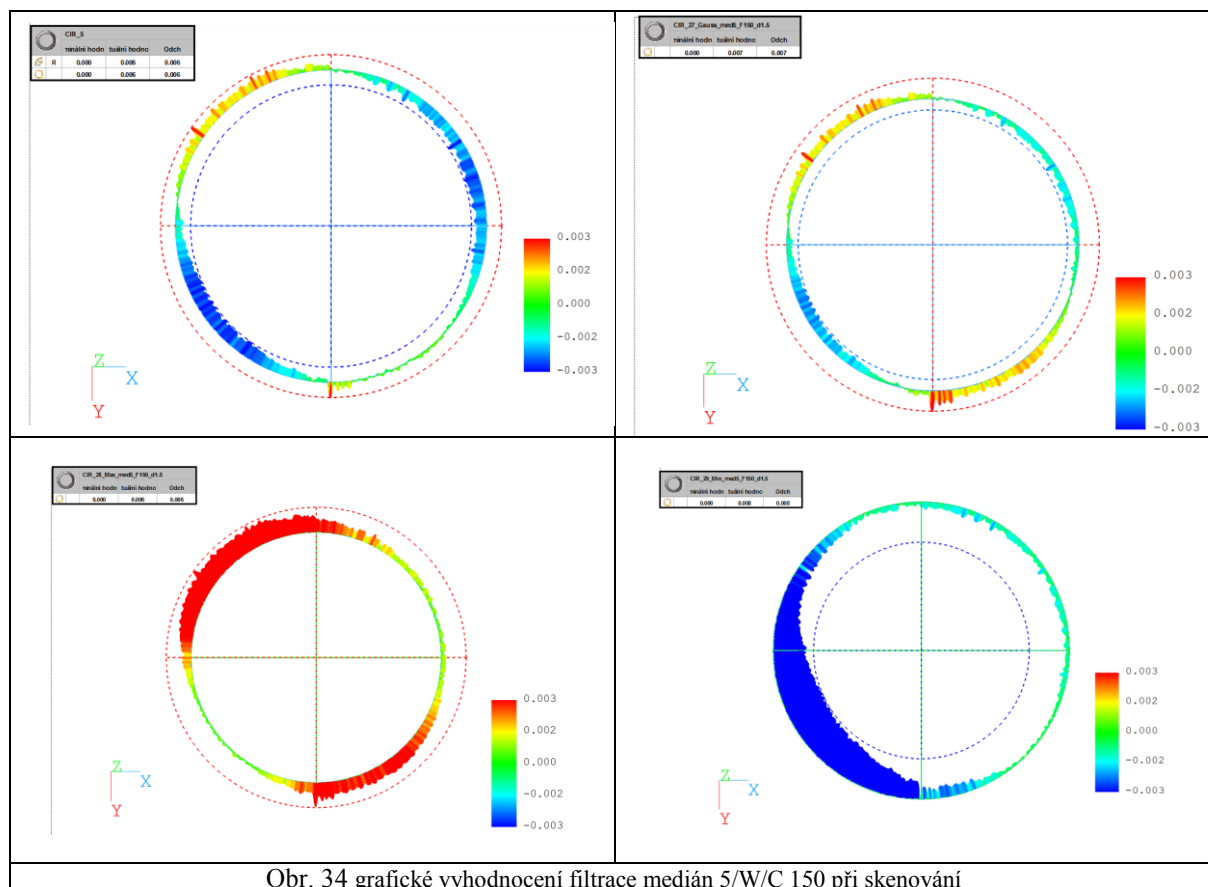
## 5.8 Grafické vyhodnocení



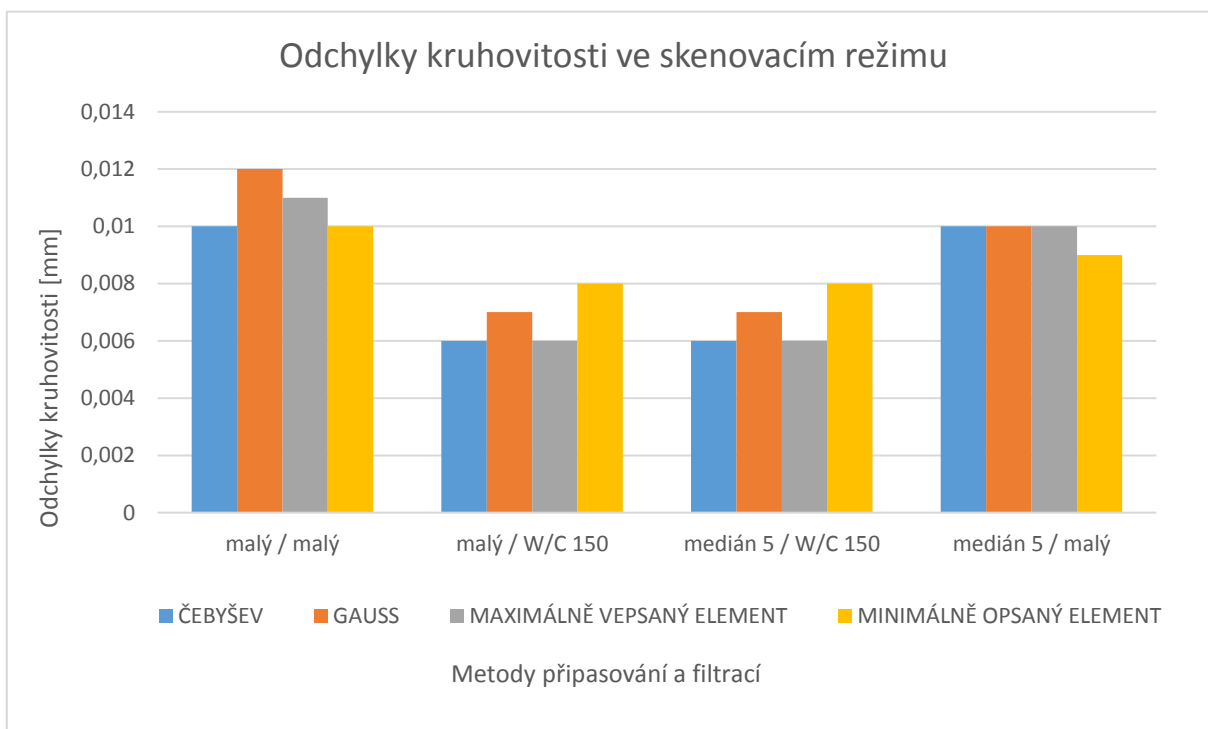
Obr. 32 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při skenování



Obr. 33 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při skenování



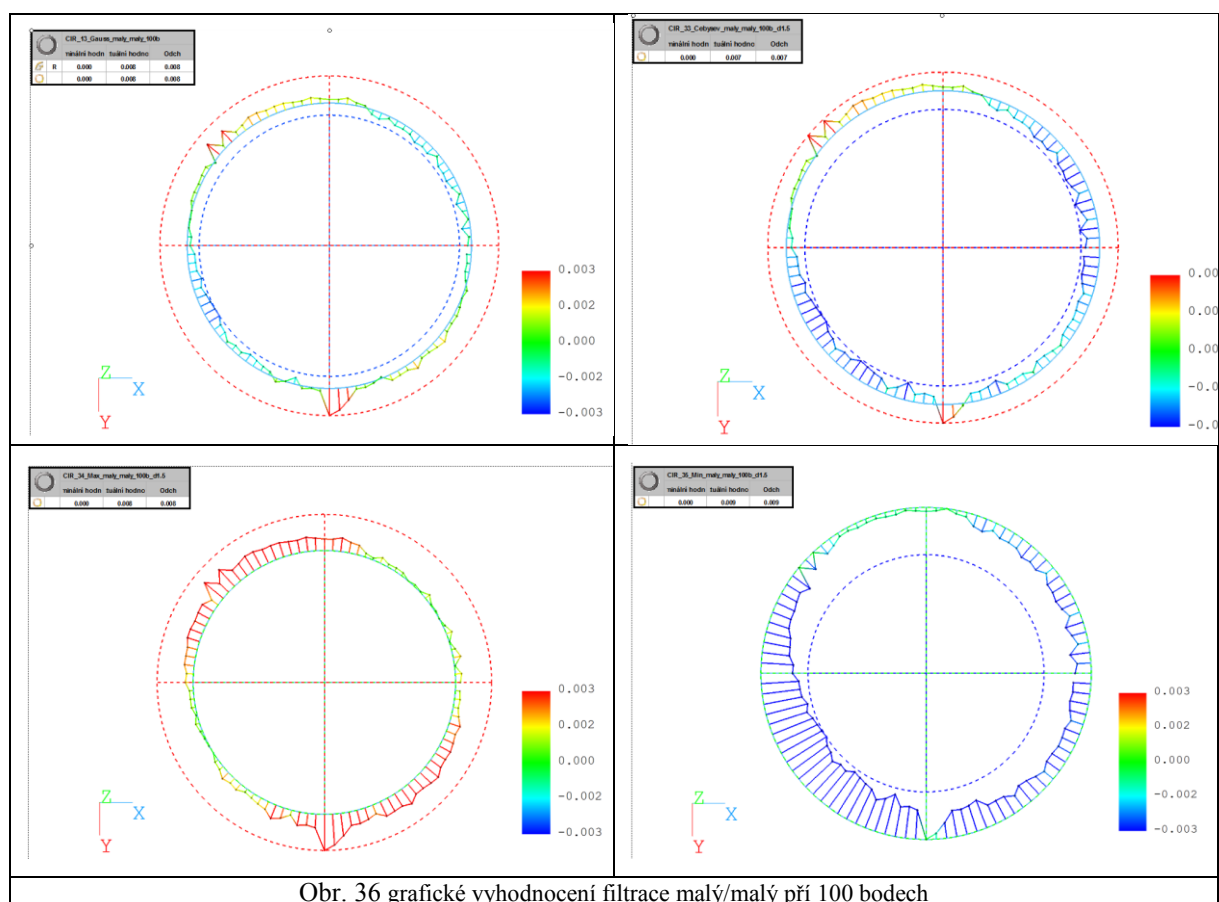
Tab.7 Odchylky kruhovitosti ve skenovacím režimu



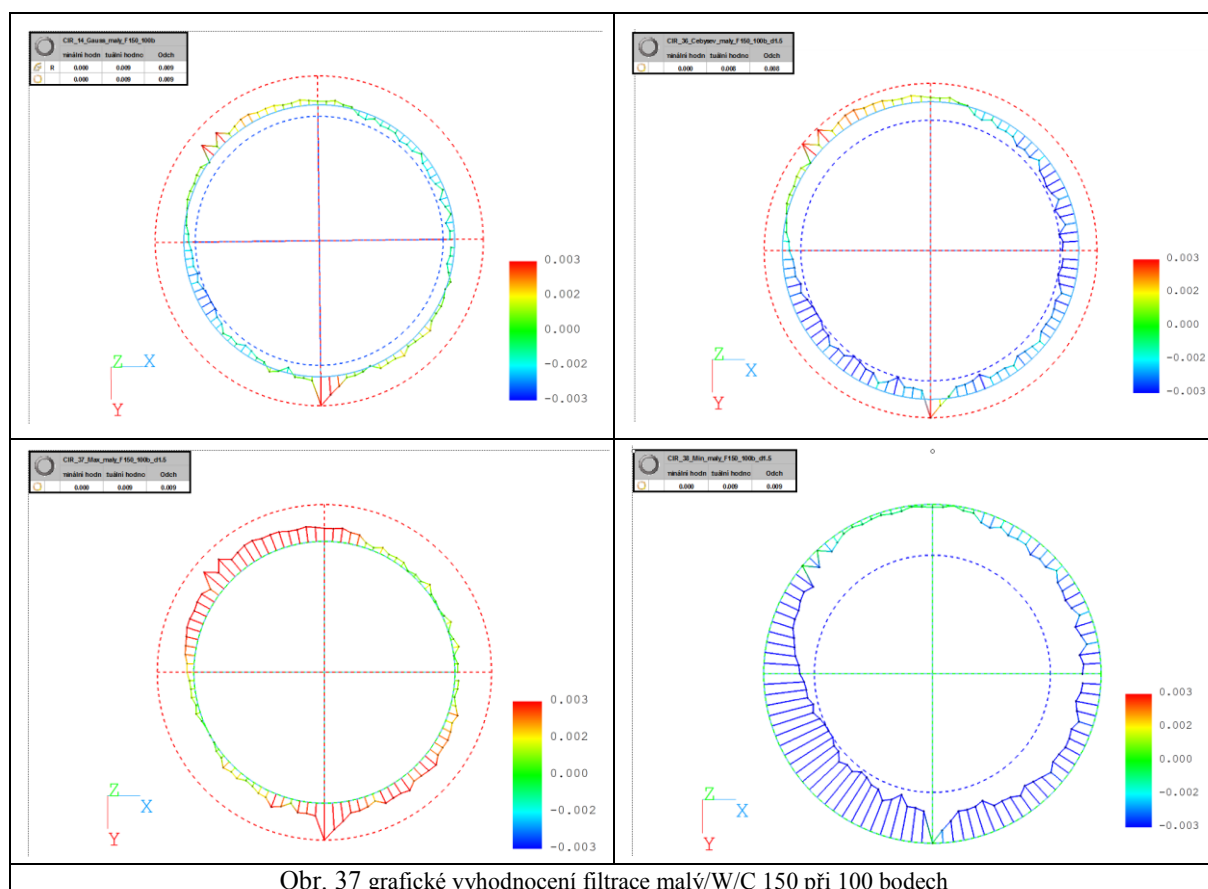
Výsledkem odchylek kruhovitosti ve skenovacím režimu je porovnávání metod připasování a filtrací, nejlepší výsledek z grafu nelze určit, protože dva typy kombinace filtrací jsou totožné. V obou našich případech lze určit jako nejlepší metodu připasování ŠEBYŠEV A VÝPOČET MAXIMALNĚ VEPSANÝM ELEMENTEM (dříve nazývána MICI). Pro náš případ měření odchylek kruhovitostí s metodou připasování výše zmíněnou, si lze vybrat i typ filtrací, a to buď *malý / W/C 150* nebo *medián 5 / W/C 150*.

Tab. 8 Statistické vyhodnocení odchylky kruhovitosti ve skenovacím režimu

Odchyly kruhovitosti ve skenovacím režimu					
Metody připisování a filtrace	Hodnoty	GAUSS	ČEBYŠEV	MAXIMÁLNE VEPSANÝ ELEMENT	MINIMÁLNE OPSANÝ ELEMENT
Malý/Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,012	0,010	0,011	0,010
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,000
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0003	0,0003	0,0003	0,0000
Malý / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,007	0,006	0,006	0,008
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,000	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0003	0,0003	0,0000	0,0003
Medián 5 / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,007	0,006	0,006	0,008
	Rozpětí [mm]	0,000	0,001	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0000	0,0004	0,0003	0,0004
Medián 5 / Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,010	0,010	0,011	0,010
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,002
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0004	0,0003	0,0003	0,0005

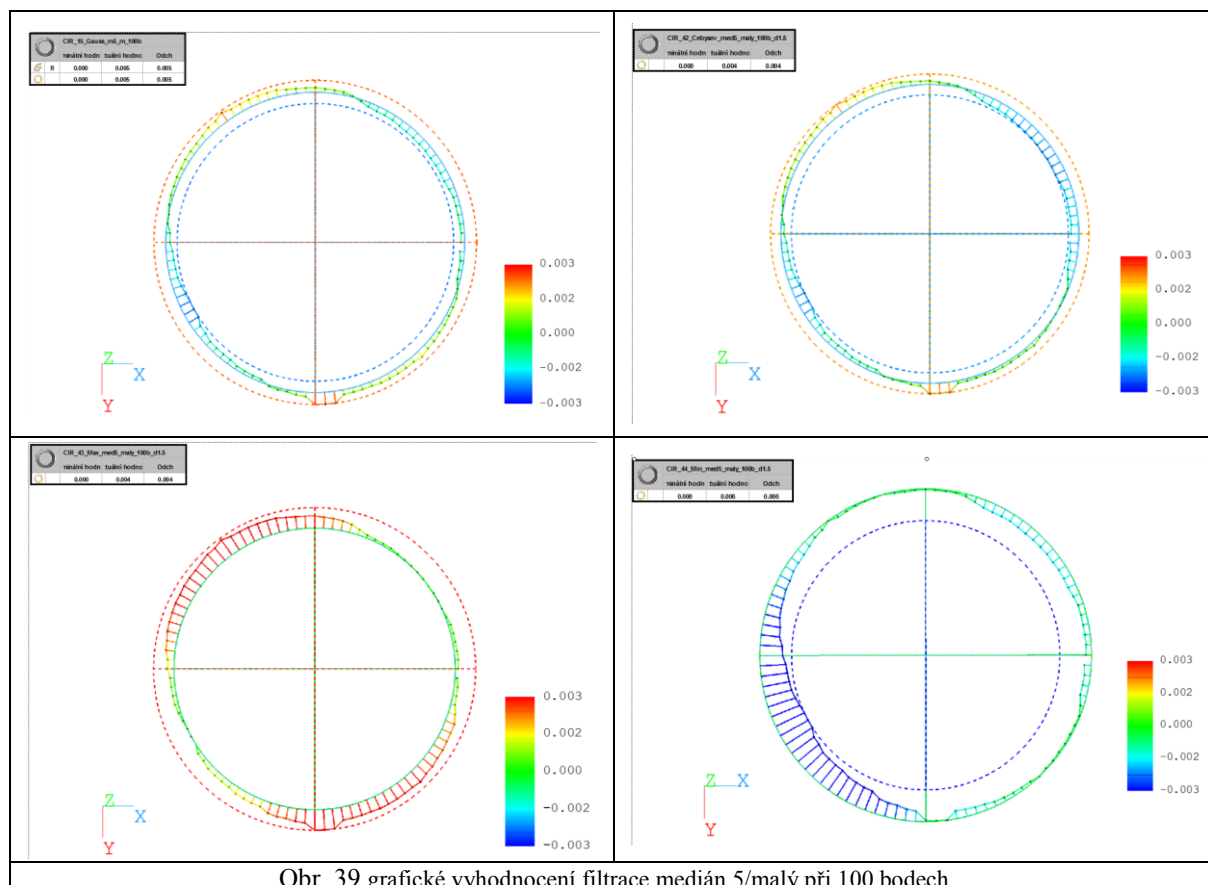
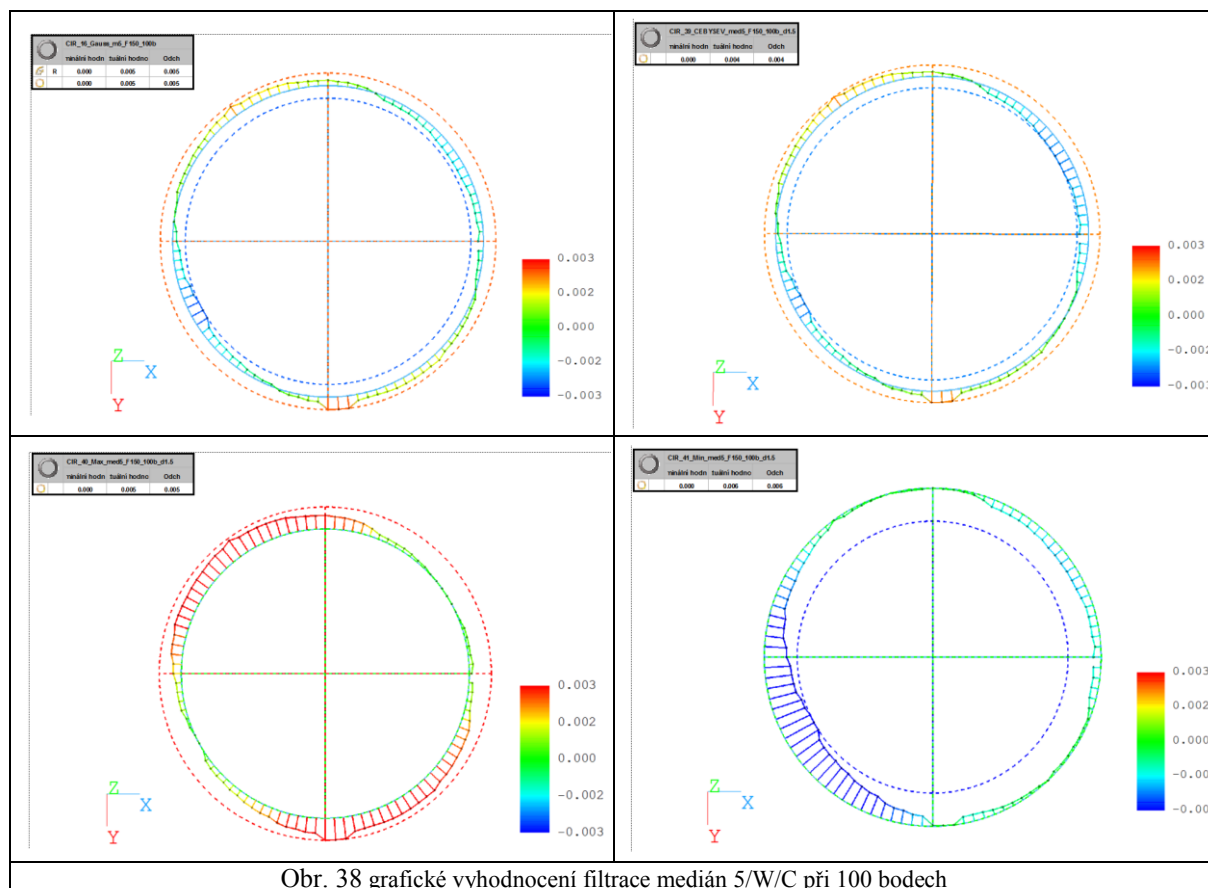


Obr. 36 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při 100 bodech

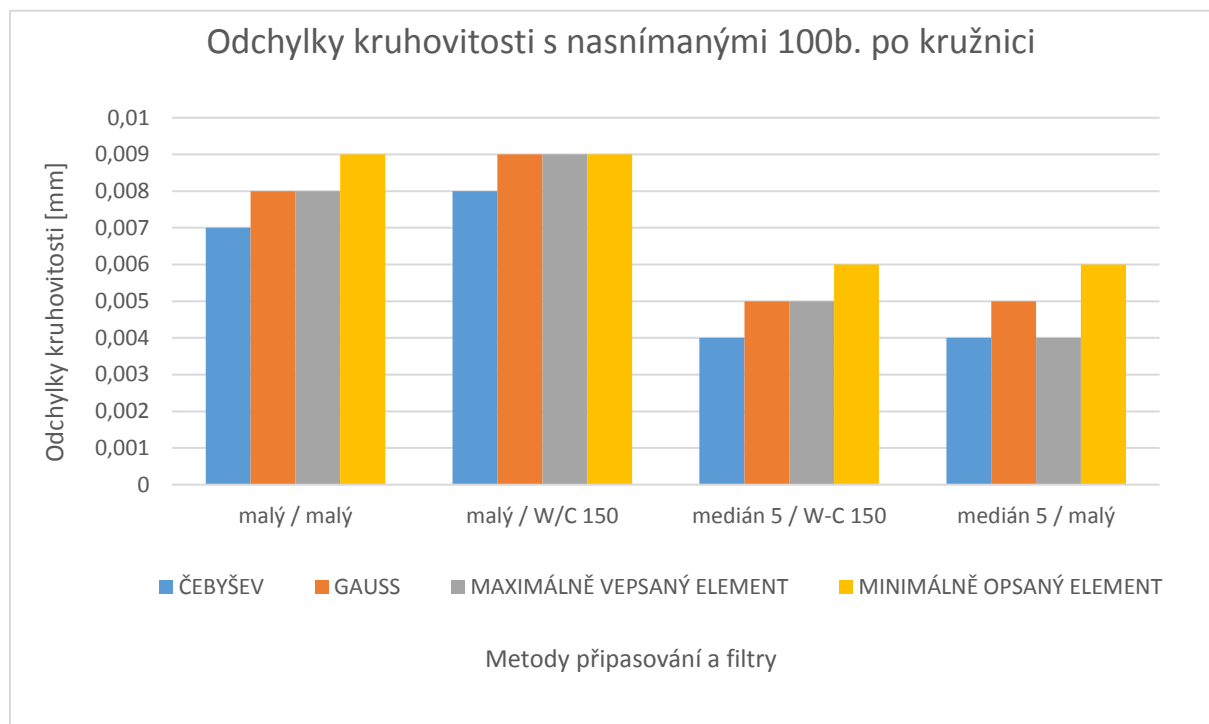


Obr. 37 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při 100 bodech





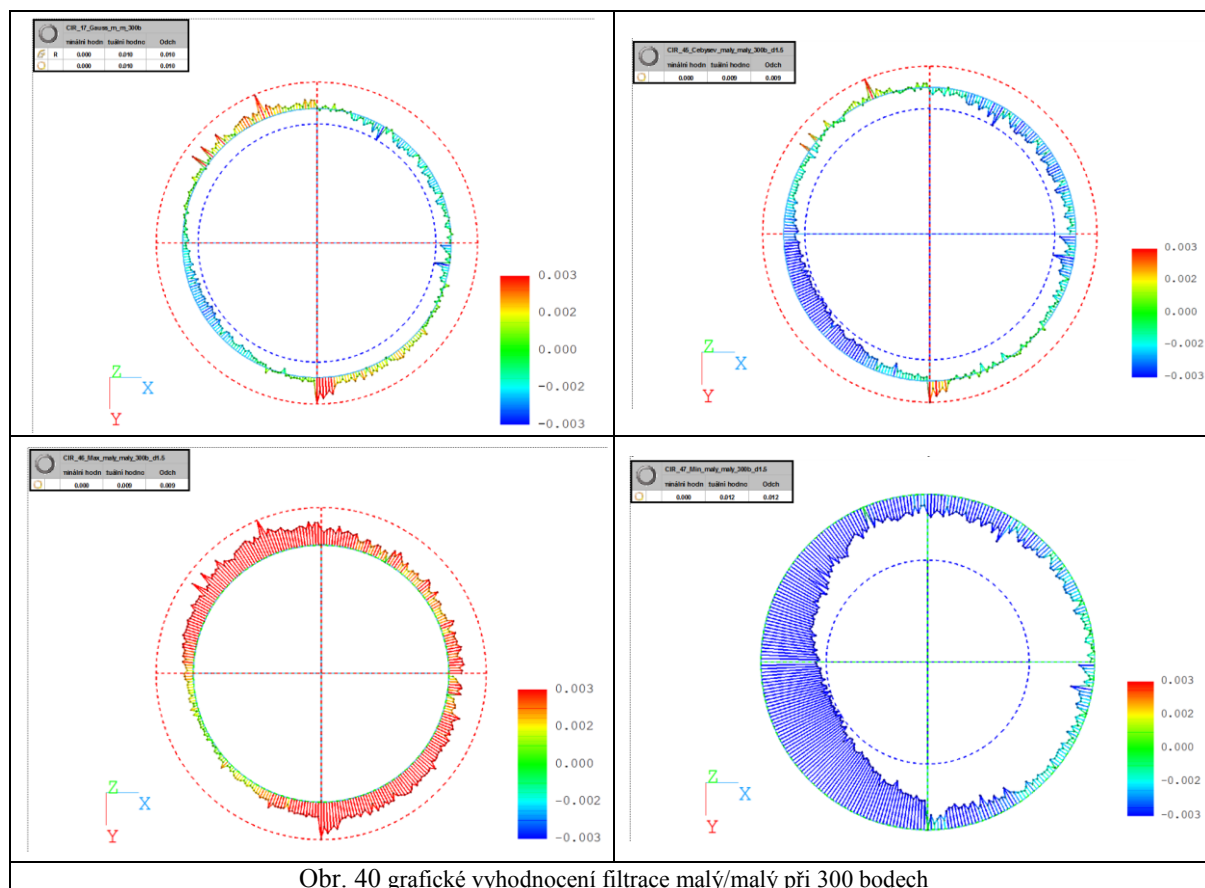
Tab. 9 Odchylky kruhovitosti s nasnímanými 100 body



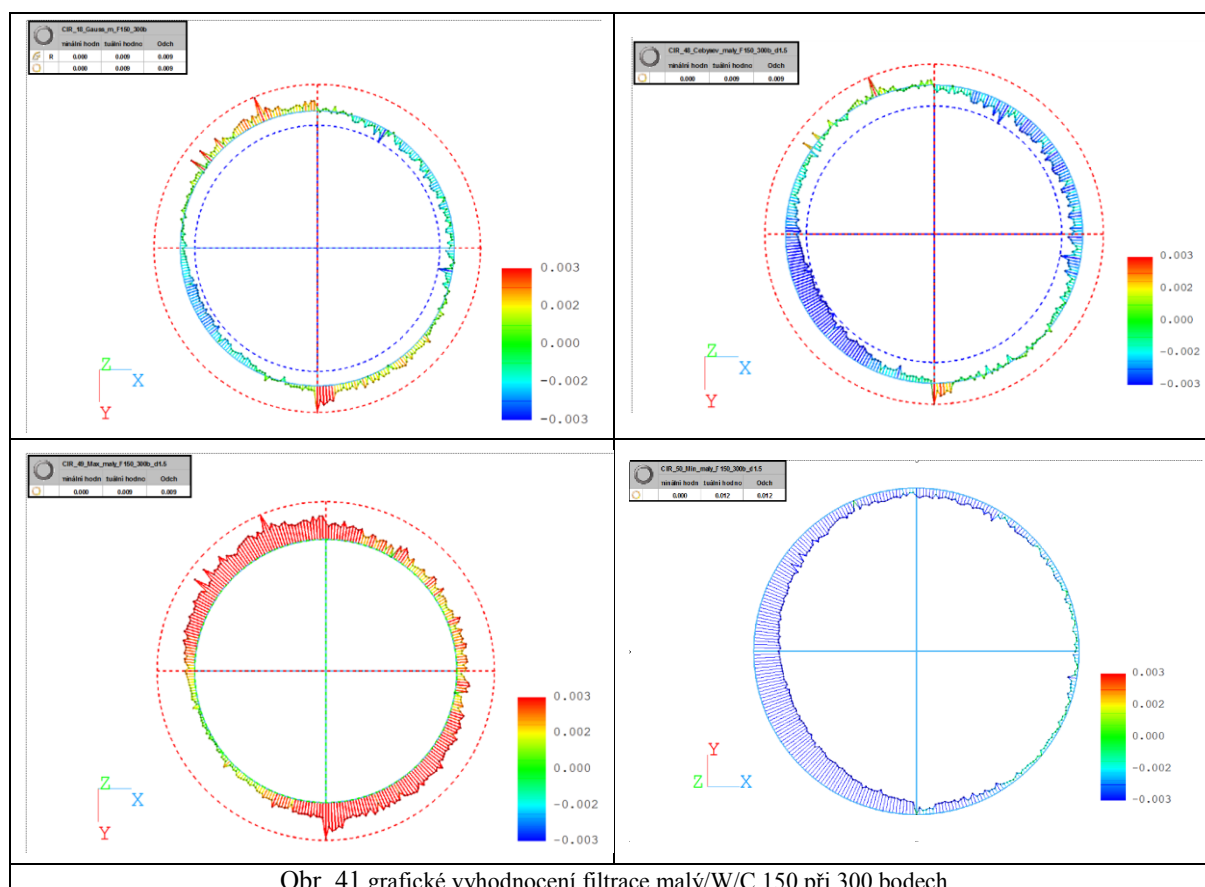
Výsledkem odchylek kruhovitosti s nasnímanými 100 body v bodovém režimu v rámci porovnávání metod připsávání a filtrů se jeví v našem případě jako nejlepším výsledkem průměru hodnot kombinace filtru *medián 5 / malý*. Tato kombinace se dostala s dvěma metodami připsávání, a to ČEBYŠEV a VÝPOČET MAXIMALNĚ VEPSANÝM ELEMENTEM (dříve nazývána MICI), na hodnotu odchylky kruhovitosti 0,004 mm. Na stejnou hodnotu se dostala také metoda připsávání ČEBYŠEV s kombinací filtru *medián 5 / W/C 150*.

Tab. 10 Statistické vyhodnocení odchylky kruhovitosti při 100 bodech

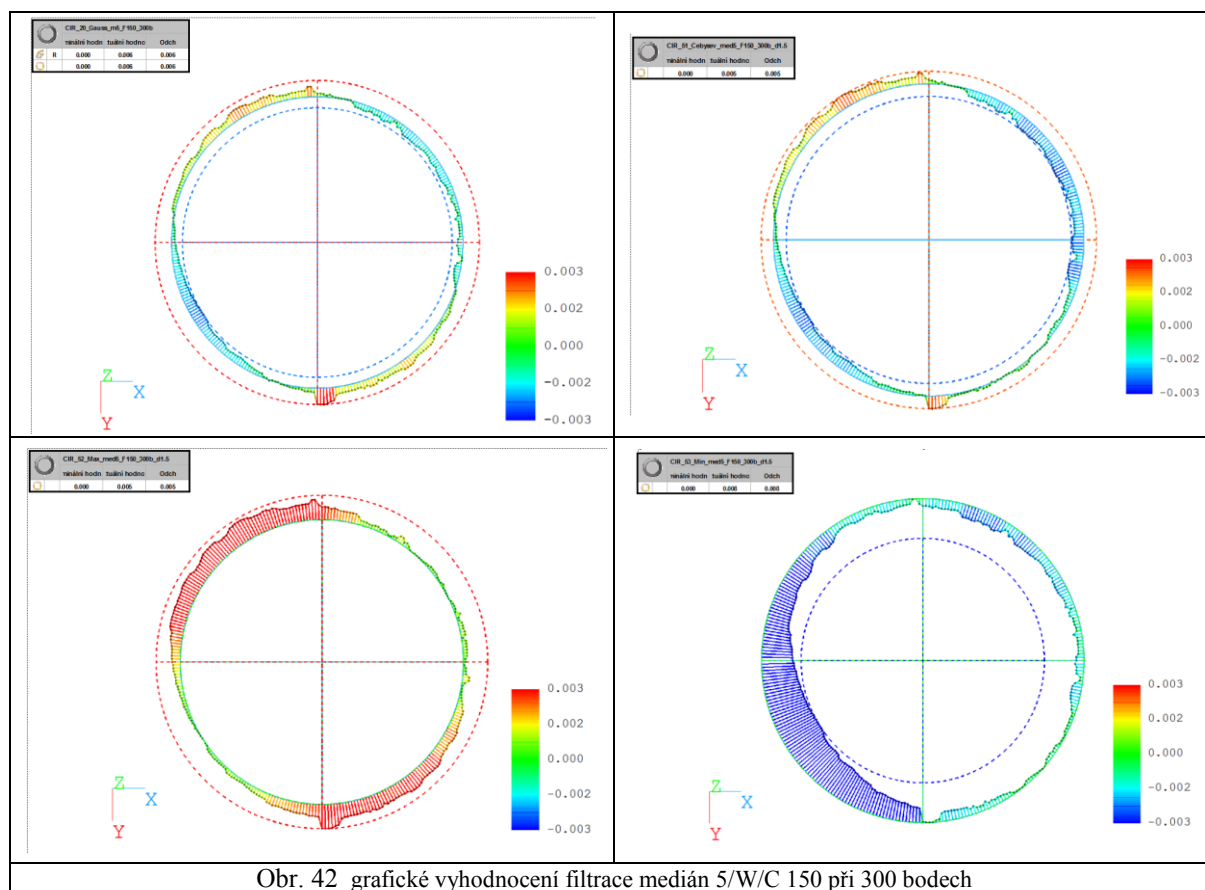
Odchyly kruhovitosti při 100 bodech					
Metody připisování a filtrace	Hodnoty	GAUSS	ČEBYŠEV	MAXIMÁLNE VEPSANÝ ELEMENT	MINIMÁLNE OPSANÝ ELEMENT
Malý/Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,008	0,007	0,008	0,009
	Rozpětí [mm]	0,001	0,002	0,002	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0005	0,0006	0,0006	0,0005
Malý / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,009	0,008	0,009	0,010
	Rozpětí [mm]	0,002	0,002	0,001	0,002
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0007	0,0007	0,0003	0,0007
Medián 5 / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,005	0,004	0,005	0,006
	Rozpětí [mm]	0,002	0,002	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0005	0,0005	0,0003	0,0005
Medián 5 / Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,005	0,004	0,004	0,005
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005



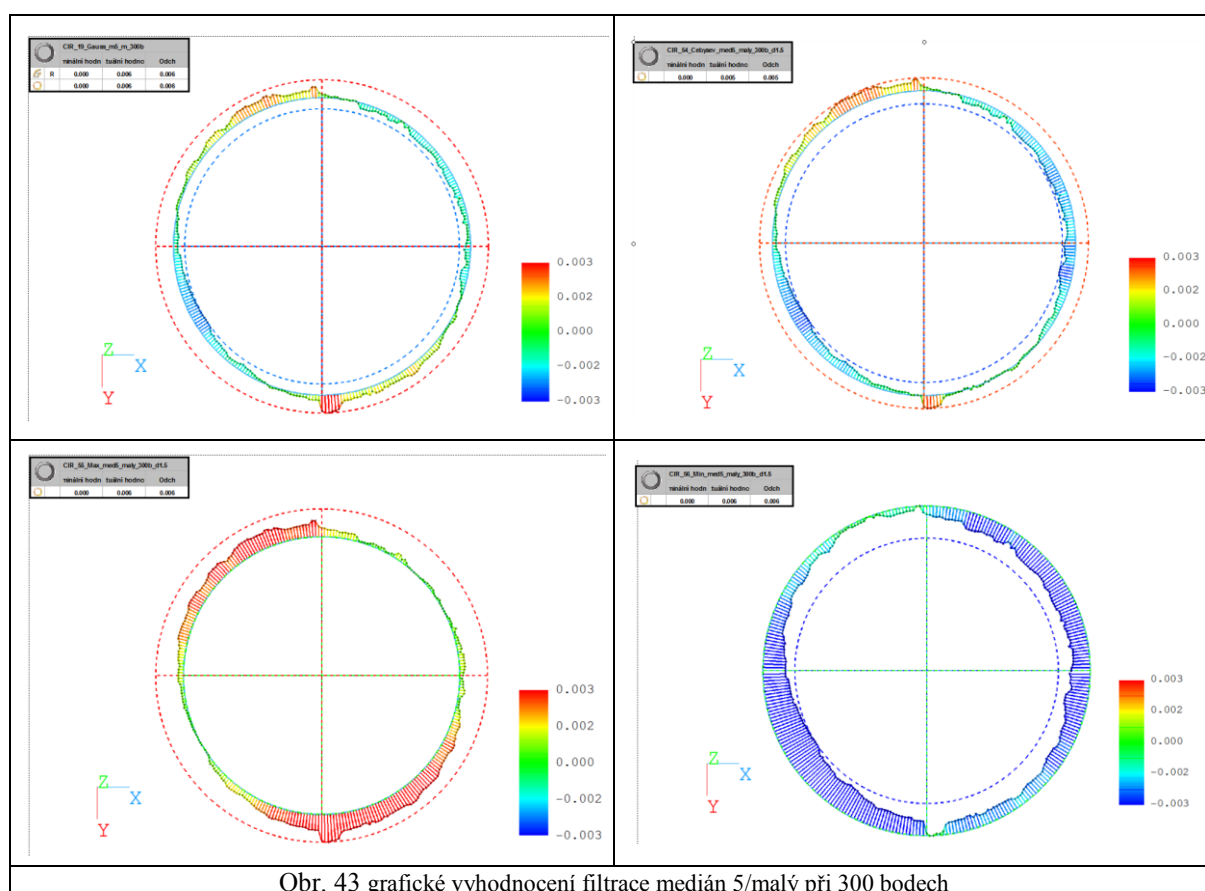
Obr. 40 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při 300 bodech



Obr. 41 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při 300 bodech

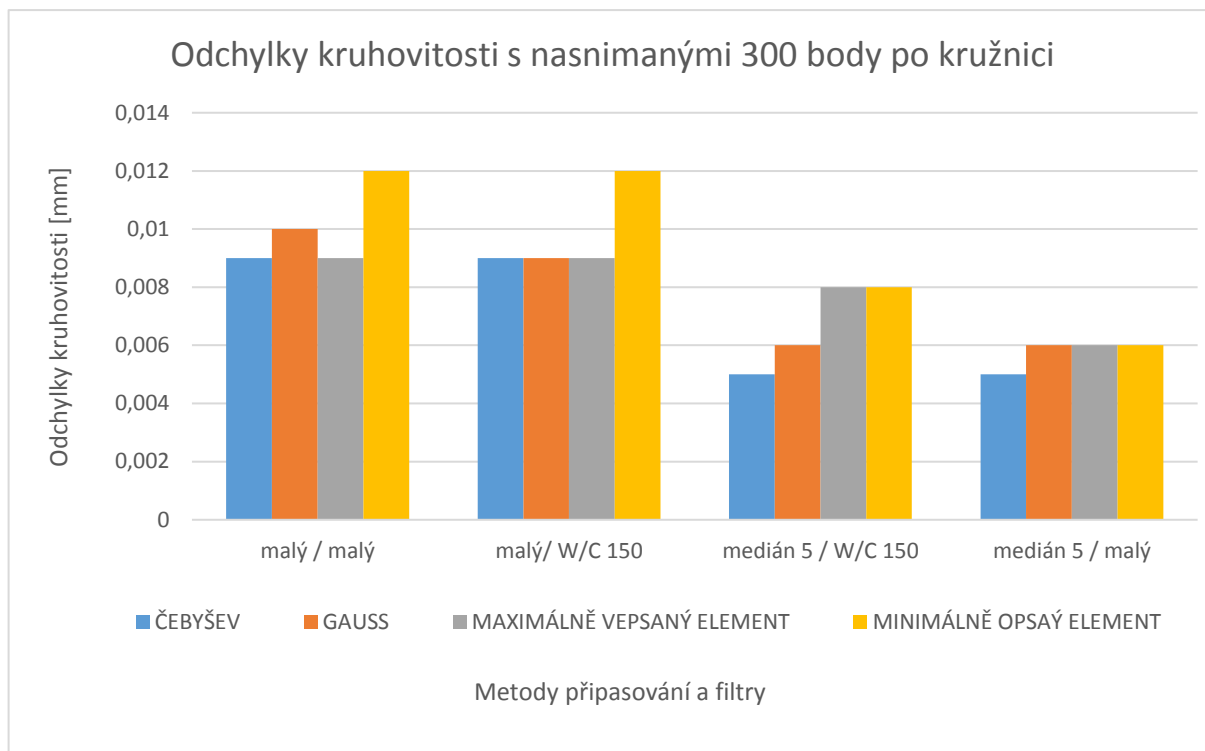


Obr. 42 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/W/C 150 při 300 bodech



Obr. 43 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/malý při 300 bodech

Tab. 11 Odchyly kruhovitosti s nasnímanými 300 body



Výsledkem odchylek kruhovitosti s nasnímanými 300 body v bodovém režimu v rámci porovnávání metod připsávání a filtrů se jeví v našem případě s nejlepším výsledkem průměru hodnot kombinace filtru *medián 5 / malý*. Na hodnotu odchylky kruhovitosti 0,005 mm se dostala metoda připsávání ČEBYŠEV s dvěma různými filtracemi, a to filtrací *medián 5 / W/C 150* a *medián 5 / malý*.

Tab. 12 Statistické vyhodnocení odchylky kruhovitosti při 300 bodech

Odchyly kruhovitosti při 300 bodech					
Metody připisování a filtrace	Hodnoty	GAUSS	ČEBYŠEV	MAXIMÁLNE VEPSANÝ ELEMENT	MINIMÁLNE OPSANÝ ELEMENT
Malý/Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,010	0,009	0,009	0,012
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Malý / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,009	0,009	0,009	0,012
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003
Medián 5 / W/C 150	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,006	0,005	0,005	0,008
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,002
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005
Medián 5 / Malý	Průměr hodnot $\bar{x}$ [mm]	0,006	0,005	0,006	0,006
	Rozpětí [mm]	0,001	0,001	0,001	0,001
	Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ [mm]	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004

## 5.9 Vyhodnocování měření

Měření odchylek kruhovitosti s různými metody připasování a filtrací bylo prováděno na viz. výše uvedeném CMM Wenzel v laboratoři vysoké školy Báňské technické univerzity v Ostravě. Vyhodnocením odchylek kruhovitosti bylo poukázáno na možné vlivy metod připasování, filtrací a na správné vyhodnocování odchylek kruhovitostí. V praxi se jedná o analýzu potencionálních příčin vzniku deformací u rotačních součástí, v našem případě je deformace zanedbatelná. Nejčastější pozorované aspekty jsou hranolovitost a elipsoidní tvary. Velkou roli zde hraje i drsnost materiálu, která je zahrnuta do kruhovitosti. Bavíme-li se o funkčních plochách, tak předpokládáme, že drsnost funkční plochy bude opracována jednou z metod povrchových úprav materiálu se zaměřením na funkční plochy. Elipsoidní nebo hranolovité tvary „*hřídely*“ mohou mít za následek vibrace celého stroje, úběr materiálu v místě defektu hřídele, snížení životnosti, zvýšení tepelného namáhání vlivem tření. Odchytky kruhovitosti jsou také ovlivněné samotným měřicím cyklem, vezme-li se v potaz samotná přitlačná síla snímacího dotyku na měřenou součást, zejména při plastových nebo tenkostěnných součásti může docházet ke nesprávnému vyhodnocení odchylek kruhovitosti. CMM viz. výše popsané a uvedené v této diplomové práci jako měřicí zařízení, neobsahuje funkce pro regulaci tlaku vyvíjeného snímacím systémem na měřený díl. S přitlačnou silou je spojena funkce skenovacího režimu, která vlivem přesného kopírování povrchu vnáší do měřené součásti malé vibrace z důvodu tření skenovací sondy a povrchu materiálu měřeného dílu.



## 6 Závěr

Úkolem experimentální části bylo analyzovat výsledky metod připisování a filtrací za pomoci dvou metod snímání, jedná se o metody bodového režimu a skenovacího režimu. Měření se specializovalo na měření a analýzu vyhodnocení odchylek kruhovitosti na válcovém profilu o průměru 83,8 mm s hloubkou snímání řezu kruhovitosti 8 mm od horní roviny. Měřené součásti v hloubce snímání byla naměřena drsnost povrchu  $R_a = 1,52 \mu\text{m}$  s pomocí drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-210. K samotnému měření odchylek kruhovitosti bylo použito CMM portálové stroj WENZEL LH 65 X3M PREMIUM se zvýšenou přesností, komponenty k osazení jsou od firmy RENISHAW, a to konkrétně indexovatelná hlava PH 10M a skenovací sonda SP 25M modul 1. Snímací dotyk je osazen rubínovou kuličkou o průměru 2 mm, která je umístěna na 35 mm dlouhém ocelovém dříku.

Předpoklady závěru, které byly očekávané s nejnižším vyhodnocením odchylek kruhovitosti, byli potvrzeny u Čebyševa ve všech případech. Vyhodnocení odchylek kruhovitostí s danými možnostmi filtrací podle výrobce CMM, nebylo až tak zcela jednoznačné, jak se předpokládalo na začátku experimentální práce. Prvotní domněnka byla, že režim skenování bude mít obdobné grafické parametry s bodovým režimem při 300 bodech ale se ukázalo že sken nasnímal body důkladněji. Nejsou patrné vlivy po vibracích při skenování, a tak je předpoklad že profil bude reálný ale může obsahovat drsnost, a to by se mohlo prověřit silnějším filtrem. V našem případě byl zvolený filtr W/C 150 (viz. Tab. 2 Směrné hodnoty pro nastavení filtru a počet měřených bodů pro kontrolu kruhovitosti). Lze jednoznačně říct, že tvar odchylek kruhovitosti je ve všech případech měření a vyhodnocování vybranými parametry považován za elipsoidní. Vybrané typy filtrací pro experiment jsou vybrané všechny možné typy nabízené software Metrosoft, který je od výrobce CMM předdefinován. Při porovnávání výsledků tabulkových grafů a graficky znázorněných simulací křivky kruhovitosti s experimentální součásti, jsme dospěli k vyhodnocení závěru, nejvhodnější metoda připisování je ČEBYŠEV. Tedy nejmenší pásmo mezikruží. Čebyšev má nejreálnější náměry ke skutečnému tvaru při měření odchylek kruhovitosti. Je velmi důležité podotknout že veškeré vyhodnocení a verdikty se vztahují pro naši konkrétní měřenou součást a neplatí tedy obecně.

Dalším zjištění jsou meze eliminací hodnot (medián 5), které jsou nedoporučeny pro bodovou metodu. Dle tabulkových hodnot vychází jako neoptimálnější vyhodnocení, v našem případě ale při důkladném prozkoumání grafického snímku lze zjistit, že body odlehle od optimálního tvaru (extrémní body) jsou odstřiženy a zkráceny v eliminačním okně

(viz. Obr. 10 Způsob eliminace odlehlých hodnot). Při větším počtu bodů se tyto projevy násobí a dochází ke kompletnímu zkreslení skutečné hodnoty, přičemž odchylky kruhovitosti dle číselných hodnot budou vycházet. Závěr eliminace zní, není vhodný pro větší četnost nasnímaných bodů při bodové metodě, protože výsledné hodnoty odchylek kruhovitosti nejsou zcela nerealné se skutečným tvarem měřené součásti.

Z diplomové práce plyne závěr, že bodová metoda se 100 nasnímanými body má rozptyl odchylek kruhovitosti 0,005 mm a zároveň nejmenší odchylku kruhovitosti s metodou připisování ČEBYŠEV, kdy její hodnota je 0,004 mm. Bodová metoda s 300 nasnímanými body a skenovací metoda mají stejnou hodnotu rozptylu odchylek kruhovitosti 0,006 mm. U skenovací metody s metodou připisování ČEBYŠEV jde u graficky znázorněných simulací křivky kruhovitosti vidět celý profil.

Pro nejpresnější metodu měření a vyhodnocení odchylek kruhovitosti na námi měřeném dílu prohlašuji metodu připisování ČEBYŠEV s filtrací *malý / W/C 150* a použití skenovací metody.

Na základě u grafického výstupu pro konkrétní situaci je třeba volit filtry a eliminací, které jsou závislé na zkušenostech operátora, internímy normy, doporučení podmíněné normami ČSN EN ISO 1101 a ČSN EN ISO 5459 nebo se řídit požadavky zákazníka.

Údaje z diplomové práce jsou dostačující a budou sloužit jako vstupní analýza odchylek kruhovitosti pro další rozvoj Disertační práce. Bylo by za hodno použít více typu filtrací se zahrnutím drsnosti materiálu. Je zde mnoho možností o rozšíření pracovního obsahu o problematice nebo analýze odchylek kruhovitosti a podrobněji se zabývat touto problematikou.

## **Poděkování**

Na závěr mé diplomové práce bych tímto velmi rád poděkoval vedoucí paní Ing. Lence Čepové, Ph.D. za všestranné vedení, poskytnuté rady, připomínky a odbornou pomoc při zpracovávání této práce.

Práce byla podpořena za Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

## 7 Použitá literatura

- [1] PERNIKAŘ, J., TYKAL, M., VAČKAŘ., J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno: VUT v Brně. 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0
- [2] Adamczak, S., *Pomiary geometryczne powierzchni“-zarysy kształtu falistosc i chropowatisc*; wydawnictwa Naukowo – Techniczne; ISBN: 978-83-204-3526-9;2008
- [3] *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Kruhovitost-Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti; ČSN P ISO/TS 12181-1, duben 2005*, vydal:Český
- [4] Norma ISO/TS 12181-1:2003: Geometrical Product Specifications (GPS) - Roundness - Part 1: Vocabulary and parameters of roundness
- [5] DRASTÍK, F. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Montanex 1996. 271 s.
- [6] PERNIKÁŘ J.; TYKAL M.; VAČKÁŘ J. *Jakost a metrologie – část metrologie*. CERM Brno, 2004. 151 s
- [7] MIZERA, O., *Vliv velikosti snímacího dotyku na odchylku kruhovitosti: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-TUO Fakulta strojní. 2015. 50 s.
- [8] Hexagonmetrology [ online ] 2017 [ Cit. 2017-03-024 ]. Dostupný z: [http://www.hexagonmetrology.cz/Leitz-PMM-F\\_241.htm#.WLgHIGczWzk](http://www.hexagonmetrology.cz/Leitz-PMM-F_241.htm#.WLgHIGczWzk)
- [9] Očenášová, L.: *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji: dizertačná práca*. Žilina: Žilinská univerzita
- [10] Metrossoft QUARTIS® R12 - *Užívateľská príručka*. 2015 Wenzel Mertomec AG, Chur.
- [11] Nůž PCLN-Ext: břitová destička CNMG. *ECatalog Pramet Tools* [online]. 2016 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/insertsGrid.aspx>
- [12] Carl Zeiss. s.r.o. Průmyslová měřicí technika. *Portálové měřicí stroje*. CZ\_60\_020\_158I. Germany
- [13] DRBÚL, M., ŠAJGALÍK, M., ŠEMCER, J, CZÁNOVÁ, T., PETŘKOVSKÁ, L., ČEPOVÁ, L. *Strojárska metrologia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania*. Žilina: ŽU v Žiline, strojnica fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky. 2014. 115 s.
- [14] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-1. 143 s.
- [15] MILITKÝ, Jiří a Dana KŘEMENÁKOVÁ. *Metrologie a řízení jakosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-242-6.

- [16] POTŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: studijní opora“ Strojírenská metrologie“*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0.
- [17] Šárka Tichá, *strojírenská metrologie, část 1*, Ostrava: VŠB – TU Ostrava 2006, 104 s. ISBN 80-248-0671-1
- [18] TICHÁ, Š., *Strojírenská metrologie, část 2 – Základ řízení jakosti*. Ostrava: VŠB-TUO 2006
- [19] TICHÁ, Š., *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB-TU, 2006. ISBN 80-248-129-6
- [20] Čepová, L., Petřkovská, L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava: VŠB–TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže. 2011, 100 s. ISBN 978-80-248-2514-4

## Seznam obrázků

Obr. 1 – příklad snímaného profilu na konvenčním přístroji spojitou metodou: r-poloměr

Obr. 2 Ovalita

Obr. 3 Hranolovitost

Obr. 4 Hodnocení minimální zóny pro kružnici

Obr. 5 – Metody připasování

Obr. 6 Aplikace pomocí Gausse

Obr. 7 Aplikace pomocí Čebyšev

Obr. 8 a) Aplikace pomocí výpočtu min. opsaný b) Aplikace pomocí výpočtu max. vepsaný

Obr. 9 Aplikace pomocí výpočtem jako tangenciální element

Obr. 10 Způsob eliminace odlehlých hodnot

Obr. 11 typy filtrů

Obr. 12 vizualizace skenovacího modu

Obr. 13 Nespojité metoda

Obr. 14 Relativní metoda dvoubodová metoda b) třibodová metoda symetrická c) třibodová metoda nesymetrická

Obr. 15 Konvenční měřicí stroje Roundtest RA-100 Series 211-Roundness Measuring Instruments

Obr. 16 Posuvné měřidlo

Obr. 17 Souřadnicový měřicí stroj Mitutoyo Crysta Apex C9106

Obr. 18 Portálová konstrukce – Mitutoyo Crysta Apex C9106

Obr. 19 Výložníková konstrukce – Stojanová konstrukce – Wenzel Smart CMM

Obr. 20 Dea Bravo HD

Obr. 21 Mostová konstrukce – Leitz PMM-F 30.20.10/16

Obr. 22 Části souřadnicových měřicích strojů. a) výložník, b) sloup, c) most, d) portál, e) posuvný stůl, f) suport, g) smykadlo

Obr. 23. Druhy měřicích dotyků a) kulový b) válcový c) klínový d) kapkový

Obr. 24 Rozdělení materiálu hrotů a) rubín b) nitrid c) zirkon d) diamant

Obr. 25 Obráběcí nůž s břitovou destičkou

Obr. 26 Břitová destička

Obr. 27 Ustanovená měřená součást ve sklíčidle

Obr. 28 Schéma měřené součásti

Obr. 29 Motorická indexová hlava Renishaw PH10M

Obr. 30 Měřicí dotyk 1001

Obr. 31 Referenční koule

Obr. 32 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při skenování

Obr. 33 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při skenování

Obr. 34 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/W/C 150 při skenování

Obr. 35 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/malý při skenování

Obr. 36 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při 100 bodech

Obr. 37 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při 100 bodech

Obr. 38 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/W/C při 100 bodech

Obr. 39 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/malý při 100 bodech

Obr. 40 grafické vyhodnocení filtrace malý/malý při 300 bodech

Obr. 41 grafické vyhodnocení filtrace malý/W/C 150 při 300 bodech

Obr. 42 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/W/C 150 při 300 bodech

Obr. 43 grafické vyhodnocení filtrace medián 5/malý při 300 bodech

## Seznam tabulek:

Tab. 1 Použitelnost metod připasování

Tab. 2 Směrné hodnoty pro nastavení filtru a počet měřených bodů pro kontrolu kruhovitosti

Tab. 3 Šířka oken pro funkci medián

Tab. 4 Řezné podmínky

Tab. 5 Vlastnosti materiálu

Tab. 6 Mechanické vlastnosti

Tab. 7 Odchyłky kruhovitosti ve skenovacím režimu

Tab. 8 Statistické vyhodnocení odchyłky kruhovitosti ve skenovacím režimu

Tab. 9 Odchyłky kruhovitosti s nasnímanými 100 body

Tab. 10 Statistické vyhodnocení odchyłky kruhovitosti při 100 bodech

Tab. 11 Odchyłky kruhovitosti s nasnímanými 300 body

Tab. 12 Statistické vyhodnocení odchyłky kruhovitosti při 300 bodech